Télédétection satellitaire et pêcheries thonières océaniques

FAO
DOCUMENT
TECHNIQUE
SUR
LES PÊCHES

302

Edité par
Jean-Yves Le Gall

Auteurs
Jean-Claude Bergès, Patrice Cayré, Jean Citeau, Henri Demarcq, Cécile Dupouy, Bernard Guillot, Francis Gohin, Michaël Laurs, Pierre Le Borgne, Claude Leroy, Bernard Liorzou, Francis Marsac, Michel Petit, Renaud Pianet, Jean-Michel Stretta

**ORGANISATION
DES
NATIONS UNIES
POUR
L'ALIMENTATION
ET
L'AGRICULTURE
Rome, 1989**

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

M-43
ISBN 92-5-202825-0

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, mise en mémoire dans un système de recherche bibliographique ni transmise sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit: électronique, mécanique, par photocopie ou autre, sans autorisation préalable Adresser une demande motivée au Directeur de la Division des publications, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie, en indiquant les passages ou illustrations en cause.

© FAO 1989

PREPARATION DU DOCUMENT

Ce document a été conçu comme une compilation de travaux, faisant le point sur les progrès en matière de détection satellitaire appliquée aux pêcheries thonières - il s'agit là d'un domaine important de la technologie moderne qui a été jusqu'à présent pratiquement réservé aux pays disposant de flottes à grand rayon d'action et de laboratoires des pêches disposant de compétences techniques sophistiquées. Ce document devrait permettre aux pays intéressés de mieux comprendre le degré de développement de ces applications et d'apprécier l'éventuelle nécessité d'acquérir les compétences requises.

Il n'a pu être réalisé que grâce à la collaboration généreusement offerte par les chercheurs de l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), de l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) et du NMFS (National Marine Fisheries Service, NOAA, USA) que nous remercions vivement.

La coordination de l'ensemble de l'ouvrage a été assurée par le Dr. J.Y. Le Gall, de l'IFREMER, sans qui ce document n'aurait sans doute jamais été terminé et nous le remercions plus particulièrement pour sa patience et son dévouement.

Distribution :

Bureaux régionaux de la FAO
Directeurs des pêches
Auteurs
Sélecteurs: Méthodes d'Evaluation,
Information sur les Ressources,
Suivi des pêcheries.

Le Gall, J.-Y. (ed.).
Télédétection satellitaire et pêcheries thonières océaniques.
FAO Document technique sur les pêches. No. 302. Rome, FAO. 1989. 148p.

RESUME

Les pêcheries de thons constituent un domaine privilégié pour l'évaluation de l'apport effectif ou potentiel de la télédétection satellitaire au développement des pêcheries océaniques et notamment de l'aide opérationnelle aux flottilles thonières. Ce rapport tente de faire le point sur l'état des techniques en 1987-88. Il est structuré en trois parties.

La première partie présente rapidement les espèces et les pêcheries concernées en zone tempérée : thon blanc ou germon *Thunnus alalunga* dans l'Océan Atlantique Nord-Est et l'Océan Pacifique Nord-Est, et en zone intertropicale : albacore *Thunnus albacares*, thon obèse *Thunnus obesus* et listao *Katsuwonus pelamis* dans l'océan Atlantique Intertropical-Est au large des côtes d'Afrique de l'Ouest, dans l'Océan Pacique Sud-Ouest et dans l'Océan Indien Sud-Ouest.

Les bases physiologiques de la thermoécologie et donc de la sensibilité de ces espèces à la température de la mer sont exposées brièvement.

La seconde partie présente un rappel sur les satellites, les capteurs passifs utilisés pour la détermination de la température de surface et la couleur de la mer, et les traitements informatiques du signal (corrections radiométriques) et enfin les logiciels des traitements d'images numériques générées (corrections géométriques, intégration de données exogènes, cartographie).

La troisième partie est un exposé des résultats acquis et des problèmes rencontrés dans les exemples régionaux des trois océans indiqués précédemment.

SOMMAIRE

Introduction 1

1. Espèces et pêcheries concernées dans les eaux tempérées

1.1. Océan Atlantique Nord-Est et Méditerranée 3
1.1.1. Germon 3
1.1.2. Thon rouge 6
1.2. Germon de l'Océan Pacifique Nord-Est 8

2. Espèces et pêcheries concernées en zone intertropicale

2.1. Panorama des pêcheries de thonidés en Atlantique intertropical 9
2.2. Espèces et pêcheries de thonidés des eaux tropicales de l'Océan Indien 21
2.3. Panorama de la pêche thonière dans le Pacifique Sud-Ouest 31

3. Bases physiologiques de la thermoécologie des thons

3.1. Physiologie de la thermorégulation des thons 43
3.2. Relation capturabilité température de surface 49

4. Télédétection satellitaire de l'environnement des pêcheries : les outils et le traitement de données

4.1. Les satellites météorologiques 51
4.2. Mesure satellitaire de la couleur de la mer : l'expérience CZCS 59
4.3. Correction géométrique d'image 63
4.4. Restitution de la température de surface de la mer à la résolution Météosat par intégrationde données exogènes 67
4.5. Cartographie automatique des champs thermiques de surface par synthèse d'images de télédétection et de données *in situ* 73

5. Exemples régionaux d'application

5.1. Pêcheries de germon de l'Atlantique Nord-Est 79
5.1.1. Cartes de température de surface de la mer réalisées par le Centre Météorologique Spatial pour l'assistance à la pêche au germon dans l'Atlantique Nord-Est 79
5.1.2. Pêcheries de germon de l'Atlantique Nord-Est; utilisation des données AVHRR de NOAA 81
5.2. Application de la télédétection satellitaire au germon du Pacifique Nord 87
5.3. Télédétection aéro-spatiale et pêche thonière en Atlantique inter-tropical 99
5.4. Pêcheries de thons tropicaux de l'Océan Indien Occidental 111
5.5. Contribution de la télédétection aérospatiale à l'étude des thonidés du Pacifique occidental 127
5.6. Analyse et limites des méthodes sur quelques cas régionaux 139

Conclusion : prophétie, prédiction ou prévision 147

Listes des auteurs 148

AVANT-PROPOS

Amorcé par la tradition séculaire dela pêche artisanale dans le domaine côtier, le développement récent, rapide et important des pêcheries de thons n'a progressé que par la mise en exploitation des ressources thonières du grand large des quatre océans : Atlantique, Pacifique, Indien et Sub-Antarctique.

Les caractéristiques biologiques des thons et notamment des migrations à longue distance, éventuellement transocéaniques pour certaines espèces, nécessitent le recours à des outils d'observation synoptique permettant l'observation et la compréhension des mécanismes et du fonctionnement de l'océan mondial. La télédétection satellitaire est un des seuls outils ou ensembles cohérents de techniques ayant cette ambition et les moyens de cette ambition.

Mon engagement personnel passé dans le développement des programmes spatiaux en France et actuel au niveau européen, ajoute au plaisir que j'éprouve à présenter le rapport sur la télédétection satellitaire et les pêcheries de thonidés océaniques, rapport commandé par Jacques Marcille du service d'évaluation des ressources halieutiques de la FAO (Agence des Nations Unies pour le développement et l'alimentation) et coordonné par Jean-Yves Le Gall de la Direction des Ressources Vivantes de l'IFREMER.

Ce rapport regroupe les contributions des meilleurs spécialistes français des différents organismes de recherche scientifique concernés (IFREMER, ORSTOM, Météorologie Nationale) et étrangers (NOAA/NMFS) et fait le point sur l'etat de l'art en 1988 dans le domaine.

En océanographie spatiale de nouveaux lanceurs, vecteurs et capteurs passifs ou actifs seront disponibles dans les années qui viennent et contribueront à une meilleure connaissance des pêcheries et à l'aide opérationnelle aux flottilles océaniques.

Yves SILLARD
President-Directeur Général
Institut Français de Recherche
pour l'Exploitation de la Mer

Télédétection satellitaire et pêcheries thonières océaniques

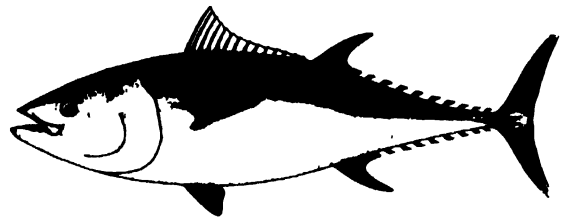
INTRODUCTION

L'intérêt croissant que portent les océanographes physiciens, géophysiciens et climatologues à la télédétection satellitaire depuis les satellites de premières générations : série TIROS, METEOSAT, SEASAT se traduit par la très forte demande de nouveaux satellites océanographique tel GEOSAT, TOPEX, etc...

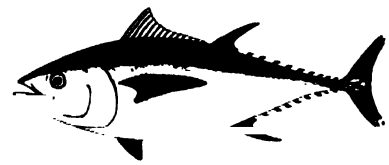
Le problème posé aux biologistes des pêches depuis une dizaine d'années est l'évaluation de l'apport réel de cet ensemble de techniques de l'ère satellitaire à deux volets de leur discipline : l'évaluation des ressources halieutiques et la conduite opérationnelle des flottilles exploitant les espèces de poissons pélagiques superficiels, et les thons particulièrement. L'enjeu est économiquement important : en 1986, les captures mondiales de thonidés ont été de 2,5 millions de tonnes de produit de haute valeur.

A priori, le problème est intéressant et la technique séduisante en raison de la parfaite adéquation entre l'échelle temps/espace de l'observation : un pouvoir de résolution au sol de l'ordre du kilomètre carré, une fréquence de collecte de l'ordre de la journée et l'échelle espace/temps du phénomène océanographique supposé influer sur la distribution de ces espèces : fronts thermiques, tourbillons... et enfin le pouvoir de mobilité des flottiles : de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres en quelques heures.

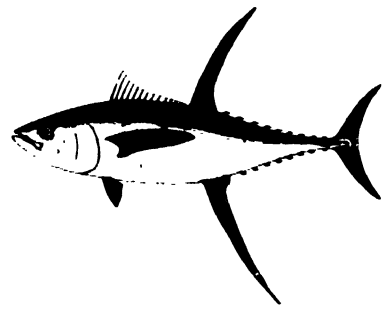
Il est donc logique qu'après avoir utilisé les ressources de la télédétection aéroportée, les biologistes des pêcheries thonières tentent d'évaluer objectivement les potentialités d'utilisation de la télédétection satellitaire pour la connaissance et l'amélioration des performances économiques des pêcheries thonières. C'est l'objectif de ce rapport.



Thon rouge *Thunnus thynnus* (Linneaus, 1758)



Thon obèse *Thunnus obesus* (Lowe, 1839)



Albacore *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788)

Germon *Thunnus alalunga* Bonnaterre, 1788

Bonite à ventre rayé *Euthynnus pelamis* (Linneaus, 1758)

Tableau : Evolution des prises de thons de 1979 à 1986
(source : FAO)
(unités : milliers de tonnes métriques)

Années	Atlantique			Indien			Pacifique			Total		
	1979	**1986**	**Δ%**	**1979**	**1986**	**Δ%**	**1979**	**1986**	**Δ%**	**1979**	**1986**	**Δ%**
Listao	87 174	127 304	46,0	32 662	141 023	331,8	758 309	815 796	41,1	698 685	1 084 193	55,2
Albacore	144 159	149 373	3,6	60 649	101 282	67,0	379 222	523 707	38,1	584 309	774 362	32,5
Thon obese	33 060	60 013	81,5	31 632	41 474	31,0	121 684	146 807	20,6	186 376	248 324	33,2
Germon	74 325	66 975	- 9,9	12 233	28 245	130,9	114 696	84 359	- 26,4	201 254	179 579	- 10,8
Thon rouge (sud)	13 330	22 523	69	–	–	–	20 108	15 019	- 25,3	33 438	37 552	12,3
Thon rouge (nord)	7 629	2 319	- 69,6	18 142	20 010	10,3	7 109	2 372	- 66,6	32 880	24 701	- 24,9
Total	**360 217**	**428 507**	**18,9**	**155 318**	**332 034**	**–**	**1 221 128**	**1 588 060**	**–**	**1 736 663**	**2 348 711**	**35,2**
%	20,7	18,2	–	8,9	14,2	–	70,3	67,6	–	100	100	–

1. Espèces et pêcheries concernées dans les eaux tempérées

par Bernard LIORZOU
IFREMER-Station de Sete

1.1. Atlantique N.E. et Méditerranée

1.1.1. GERMON (Thunnus alalunga Bonnaterre 1788)

Le germon de l'Atlantique N.E. se rattache au stock Nord dont la séparation avec le stock de l'hemisphere Sud a ete fixee à 5° N. On suppose egalement l'existence d'un stock distinct en Mediterranee dont les interactions avec le stock Atlantique sont mal connues.

Le germon, de par sa qualite commerciale, fait l'objet de pêches saisonnières, a l'aide de differents engins, en fonction des mouvements migratoires de l'espece.

1.1.1.1. Les pêcheries dans l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée (fig. 1)

Le germon de l'Atlantique Nord est capture par les pêcheries de surface (ligneurs, canneurs) et par les pêcheries de pleine eau (palangriers et tout nouvellement pêche aux filets maillants ainsi que pélagiques bœufs).

Les pecheries de surface exercent leur activite de mai a septembre et prennent surtout de jeunes poissons de deux a cinq ans alors que les palangriers capturent des individus matures de cinq ans et plus.

Depuis 1981 s'est developpee une pêche a l'appât vivant en Mediterranee occidentale effectuee par les canneurs espagnols du Pays basque durant les mois d'octobre a decembre.

Les differentes nations pêchant dans l'Atlantique Nord ont capture 40 400 TM en 1985 dont 23 300 TM ont ete capturees par les pêcheries de surface dans l'Atlantique N.E. (Espagne, France et Portugal). En Mediterranee, les captures declarees s'elevent a 5 200 TM en 1985 (Espagne, Italie et France).

1.1.1.2. Biologie et environnement du germon

Distribution du germon dans l'espace et dans le temps

Le germon a une duree moyenne de vie d'une huitaine d'annees et sa croissance ralentit fortement à sa maturite.

La ponte

Les pêches effectuées par les palangriers indiquent que la capture de germons matures (supérieur à cinq ans en Atlantique et supérieur à trois ans en Méditerranee) s'effectue dans des régions dont la temperature de surface est toujours supérieure a 24° C. Les œufs et larves ont été identifiés dans les mêmes eaux (Nishikawa et al. (1978), Piccinetti, Piccinetti Manfrin, Dicenta (1981) soit pour l'Atlantique Nord, a l'Ouest du 40° W dans une zone comprise entre le tropique du Cancer et l'Equateur et pour la Mediterranee dans la mer Tyrrhenienne et Ionienne. La ponte du germon se deroulerait d'avril à septembre.

Les juveniles

On dispose de peu de renseignements sur la localisation des juveniles. Tout au plus pense-t-on qu'ils gagnent des latitudes plus elevees dans des eaux de surface comprises entre 20 et 24°.

Les immatures

C'est cette phase de la vie du germon qui fait l'objet de l'exploitation en surface dans l'Atlantique Nord-Est. Les individus mesurent de 40 a 90 cm et sont immatures. Ils se tiennent dans des eaux dont la temperature de surface est de 16 a 20°, suivant a la saison estivale la montee des eaux chaudes vers le Nord-Est, montee limitee au Nord par l'extension nord de la derive Nord-Atlantique. Les poissons evoluent par bancs. On distingue trois classes d'âge correspondant aux appellations commerciales :

Bonites	45-57 cm
Demis	58-67 cm
Gros	68-80 cm

Quelques « très gros » (80-90 cm) sont parfois captures, le plus souvent dans des eaux froides.

Les immatures sont absents de l'Atlantique Nord-Est de novembre a mai. Les captures d'immatures sont rares dans l'Atlantique N.W.

Les adultes

En Atlantique Nord, ces individus sont captures par les palangriers en ete et en hiver et par les canneurs a l'automne. Les germons adultes migreraient de zones d'engraissement au Nord en hiver aux zones de reproduction plus basses en latitude en ete (Koto (1969), Beardsley (1969), Yang (1970), Le Gall (1976)). Des campagnes de recherche entre le trentième W et Terre-Neuve, à la limite du Gulf Stream, ont permis la capture en ete d'individus de 85 a 100 cm donc matures (Aloncle, Delaporte (1979, 1980)) Les developpements recents de la technique de pêche au chalut pelagique mettent en evidence la presence d'adultes en automne le long des accores du golfe de Gascogne.

L'etude de la repartition du germon au cours des differentes phases de sa vie montre que sa distribution

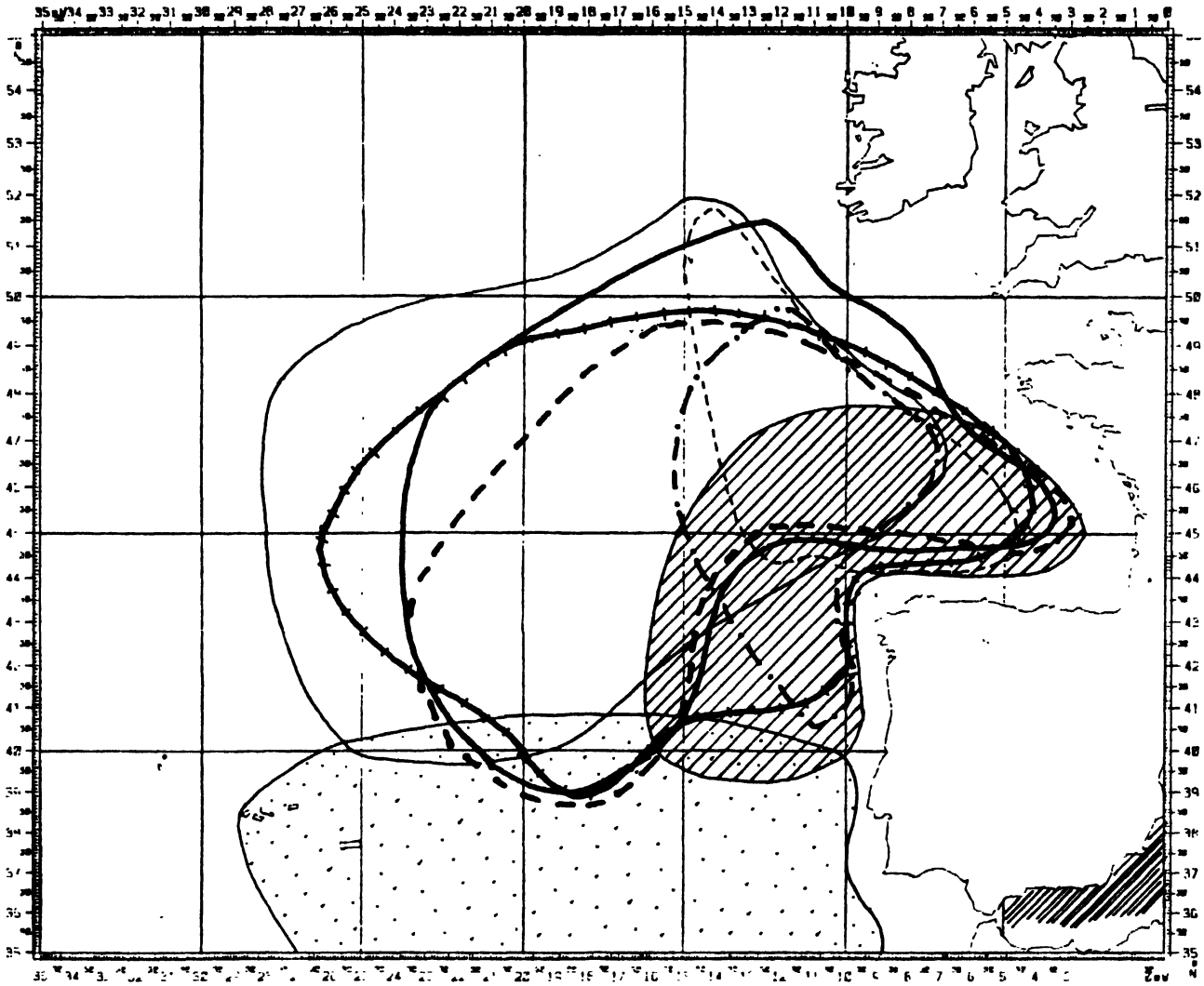


Fig. 1 — Evolution des lieux de pêche des ligneurs français et lieux de pêche des canneurs

1934 ---- 1984 —— pêcherie d'été

1962 — d'après BARD 1985 — pêcherie d'automne des canneurs

1971 ——— 1986 ++++ pêcherie d'automne-hiver

est en relation étroite avec la température de surface. Les exigences écologiques du germon impliquent que d'autres facteurs de l'environnement interviennent dans le déterminisme des migrations.

Les exigences écologiques du germon

L'essentiel de la physiologie des thonidés a été synthétisé par Sharp et Dizon éd. (1978) et, pour le germon, résumé par Bard (1981). Retenons que le germon comme tous les autres thonidés possède un mauvais système de régulation thermique. Le métabolisme des thons est basé sur des enzymes fonctionnant entre 11° et 37° C avec un maximum d'efficacité entre 25 et 30° C. L'activité métabolique intense que développe le germon lors de ses activités natatoires de déplacement et de chasse élève rapidement la température de son corps. Il semble que la solution la plus courante pour échanger cette chaleur avec l'extérieur soit pour le germon de plonger dans des eaux plus froides. C'est pour cette raison que l'espèce se rencontre au niveau des discontinuités thermiques qui sont également productrices de nourriture dont elle a besoin. Il est à noter que la capacité de régulation thermique du germon croît avec l'âge, l'affranchissant plus facilement des limites théoriques de température des eaux qu'il fréquente. Le germon en nage active consomme de l'oxygène. Sharp (1978) a évalué à 1,39 ml/l le taux d'oxygène dissous nécessaire à la survie des individus de 75 cm alors que les jeunes germons ont une demande supérieure (1,67 ml/l). La dernière limite concernant le déplacement du germon dans le milieu est en relation avec le développement de la vessie natatoire qui ne se développe qu'à la maturité de l'espèce, limitant son déplacement vertical au cours des premières années de sa vie. C'est une des raisons pour laquelle le germon immature est surtout pêché par les pêcheries de surface alors que les adultes qui changent plus facilement de profondeur sont davantage la cible des palangriers.

1.1.1.3. L'environnement hydroclimatique de la pêcherie en Atlantique N.E. et ses conséquences sur la localisation du poisson

Les travaux d'Aloncle et Delaporte (1973) ont contribué pour une large part à la connaissance des relations qui unissent le germon a son environnement.

La figure 2 resume de maniere très schématique la montée des isothermes 15 et 20° C dans le secteur concerne par la pêcherie et sur laquelle sont menées les expériences de telédetection satellitaire. Les voies de migrations possibles du germon immature y sont tracees sans toutefois pretendre qu'elles sont toutes exactes.

Le poisson migre rapidement en mai dans une direction S.W.-N.E. pour se presenter fin mai ou début juin dans les limites de la pêcherie. Sa montee au large des Açores ou entre les Açores et la côte est fonction de l'endroit où le rechauffement de l'Océan est le plus important. Les bancs se concentrent dans les indentations d'eaux chaudes. Les migrations sont alors à caractere trophique a la recherche de nourriture. Les differents maillons de la chaine alimentaire se développent preferentiellement dans les zones de fronts thermiques persistants amenant en finalité le thon a frequenter ces secteurs. La pêche de surface sur ces concentrations ne peut etre effective que si le poisson se situe à une

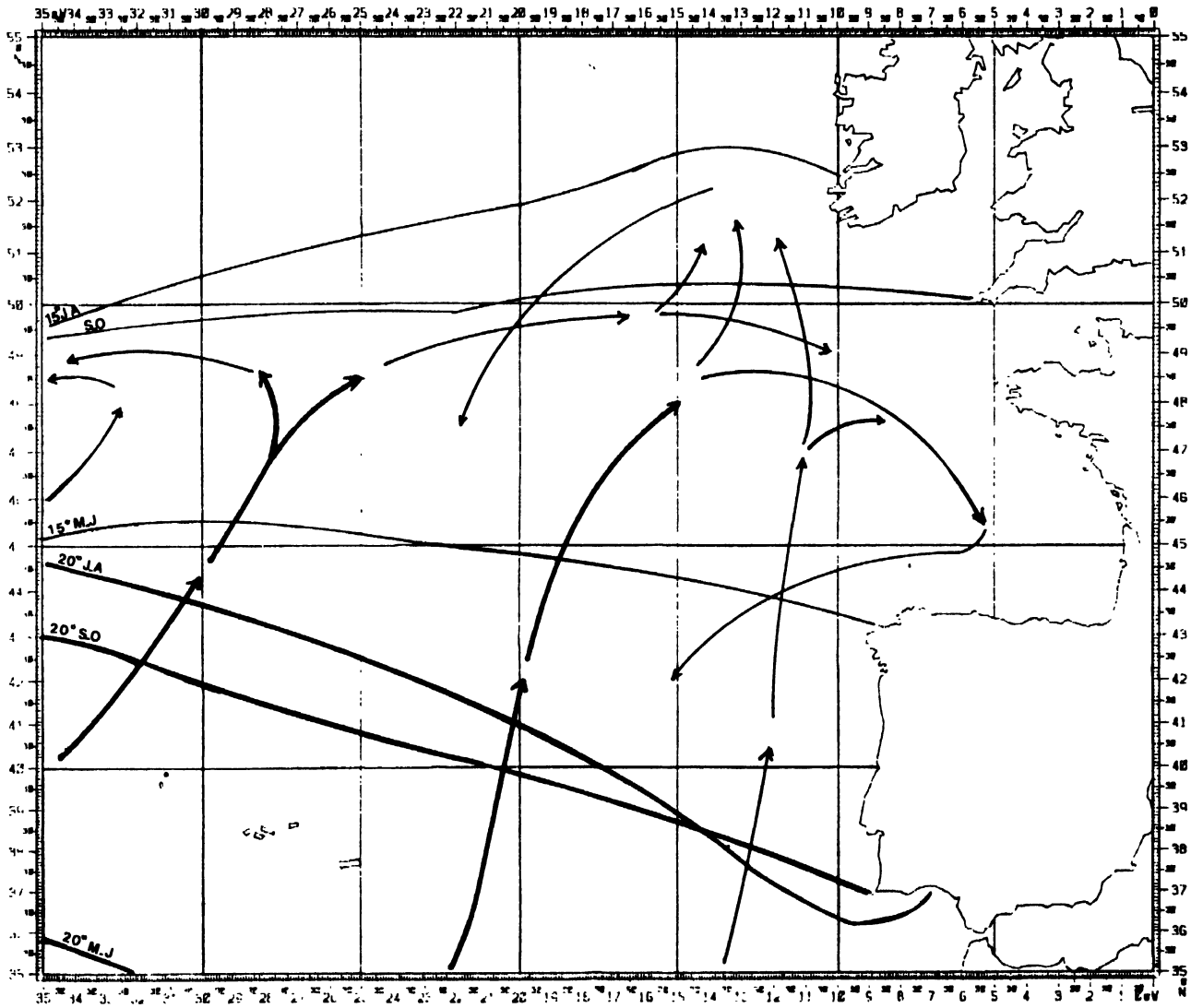


Fig. 2 – Evolution des isothermes 15 et 20° dans l'Atlantique NE par periode de deux mois, entre mai et octobre et voies de migration possibles du germon

profondeur suffisamment faible dans une eau claire afin que les leurres remplissent leur rôle attractif. La présence d'une thermocline peu profonde dans des eaux bleues a proximite d'un front thermique de surface persistant depuis au moins trois jours augmente donc la probabilite de concentration du germon.

Le poisson repart en automne vers le S.W., avec le retrait des eaux chaudes. En Méditerranee, le phénomène de concentration du germon est identique a celui observe en Atlantique. L'environnement hydroclimatique correspond à celui du thon rouge et sera decrit dans ce chapitre. La periode la plus favorable d'exploitation du germon en Méditerranee semble être d'août a décembre.

On voit donc que la téledétection pourrait apporter plusieurs types de renseignements très utiles pour le pilotage d'une flottille germonière à savoir une cartographie sur un tres grand secteur :

– des isothermes de surface et des fronts persistants,
– de la couleur de l'eau,
– des secteurs à production primaire importante, premier élément de la chaine alimentaire, indiquant ainsi des zones potentielles ou effectives de présence du poisson.

Seule la température de la mer peut être acquise actuellement en temps reel et fait l'objet de l'experimentation decrite au chapitre 4 sur l'Atlantique N.E.

1.1.2. THON ROUGE (Thunnus thynnus Linne 1758)

Le thon rouge pêche en Atlantique-Est et en Mediterranee se rattache au stock Est Atlantique. Le taux d'échange avec le stock Ouest Atlantique est faible (moins de 10 %). Cette espèce est tres prisee par les Japonais qui la consomment essentiellement sous forme de Tachimi. En Europe, le thon rouge a une valeur commerciale legèrement plus faible que le thon blanc ou germon.

1.1.2.1. Les pêcheries dans l'Atlantique-Est et la Méditerranée

Le thon rouge est commun dans toute la Mediterranee puisqu'il est pêche à l'aide d'engins aussi diversifies que la senne tournante, la palangre, les madragues, la pêche a l'appât vivant, les lignes trainantes et autres lignes a main et ceci par un grand nombre de pays du pourtour mediterranéen dont les principaux sont l'Italie, l'Espagne, la France, et, a un moindre degre, le Maroc, la Tunisie, la Libye, la Turquie, la Grece et la Yougoslavie. Le Japon effectue chaque annee une incursion en Mediterranee pour y pêcher le thon rouge a la palangre. Cette activite est egalement pratiquee par le Japon en Atlantique. Les mêmes engins qu'en Mediterranée sont utilises mais les captures pour l'Atlantique Est qui se realisent du Maroc a la Norvege sont de l'ordre de 4 800 TM en 1985. Pour la même annee, les prises estimees en Mediterranee s'elevent a 18 500 TM.

1.1.2.2. Biologie et environnement du thon rouge

Distribution du thon rouge dans l'espace et dans le temps

Le thon rouge a une longetivite moyenne de vingt ans et sa croissance ne subit pas de ralentissement a maturite.

La ponte

Actuellement, et pour tout le stock Est Atlantique, deux aires de ponte ont pu être identifiées. La plus importante se situe dans la mer Tyrrhénienne ou, chaque année, les geniteurs adultes de dix ans et plus sont capturés par les senneurs italiens en ete. Les etudes menées par Piccinetti, C. Piccinetti-Manfrin G. et Dicenta A. (1981) sur les œufs et larves de thonidés en Méditerranée occidentale et en Adriatique corroborent l'hypothèse d'une importante zone de ponte regroupant le sud de la mer Tyrrhenienne, la mer Ionienne et l'Adriatique centrale et sud. La reproduction du thon rouge s'étalerait de mi-juin à fin-juillet.

Il est probable que les gros individus captures dans la mer de Marmara en avril se rendent sur des lieux de reproduction plus au sud, en mer Egée.

En Atlantique, aucune aire de reproduction n'a pu être cernee bien que la présence d'individus matures et de très jeunes thons rouges aient pu être recensés dans la baie ibero-marocaine (Furnestin et Dardignac, 1962; Aloncle 1964) et dans un secteur compris entre l'Afrique et les Canaries (Aloncle 1978).

Les juvéniles

Ils ne sont pêches que par de petits bateaux pratiquant la pêche a la ligne a main ou trainante autour des aires de ponte en automne.

Les immatures

Cette phase de la vie concerne les individus de un a quatre ans qui sont la cible privilegiee des senneurs du Nord de la Mediterranée occidentale et de l'Adriatique, ainsi que des canneurs du golfe de Gascogne.

Si on considere le 1er juillet comme date anniversaire de la naissance des thons rouges, les individus venant d'avoir un an sont pêches simultanement en Mediterranee dans le golfe de Gênes et au nord des Baleares et en Atlantique dans le golfe de Gascogne a partir du mois de juillet. Cette constatation implique une capacite de migration d'une partie des jeunes thons de la Mediterranee vers l'Atlantique.

Le reste des immatures semble effectuer une migration en latitude et sont pêches des le printemps dans le nord du bassin occidental de la Mediterranee, dans des eaux de surface superieures a 14° C.

Les adultes

Ils sont surtout pêches en Atlantique comme en Mediterranee par les palangriers, mais egalement en avril-mai puis en automne par les senneurs frequentant le Nord du bassin occidental de la Mediterranee. Les gros individus dont l'âge est superieur a dix ans sont captures par les madragues, les palangriers et les senneurs italiens.

La grande repartition du thon rouge du stock Est montre qu'il effectue au cours de sa vie des migrations importantes; les unes sont liees a la reproduction et les autres a la recherche de la nourriture et de conditions de milieu favorables a sa survie.

Les exigences écologiques du thon rouge

De même que pour le germon, la physiologie du thon rouge a ete etudiee par de nombreux scientifiques et la synthese en a ete realisee par Sharp et Dizon ed. (1978).

Le thon rouge est au sommet de l'évolution des thonides et dispose de capacité de régulation thermique accrue. Sa temperature interne varie entre 24 et 35° C et dispose de deux echangeurs thermiques lateraux developpés. Le thon rouge a réussi a s'affranchir du domaine tropical pour sa reproduction bien qu'il soit capable de survivre dans des eaux à 30° C. Sa distribution pélagique est très large puisqu'il a été pêché dans des eaux ne dépassant pas 6° C. Néanmoins, les fourchettes de temperature dans lesquelles il est le plus souvent pêche se situent entre 15° et 22° C mais varient suivant l'âge des individus (R. Rivas, 1977).

Le thon rouge semble fuir les eaux fortement salées (> 30 ‰) mais fait des incursions en mer Noire où la salinité est de 18 à 20 ‰.

Sa vessie natatoire a un développement de type extensif lui permettant de changer facilement de profondeur. Les grands individus sont parfois pêches à la palangre jusqu'à 500 m de fond.

1.1.2.3. L'environnement hydroclimatique de la pêcherie de sub-surface en Atlantique N.E. et en Méditerranée et ses conséquences sur la migration et la localisation du poisson

Le thon rouge semble s'affranchir davantage de son environnement thermique que le germon. Son deplacement est guide par les grandes veines de courant vers les secteurs de reproduction ou de nourriture. Ces migrations commencent au printemps lors du rechauffement des masses d'eau en Méditerranee.

Les résultats des experiences de marquage synthétises par Farrugio (1981) et les travaux de Lozano Cabo (1959) prouvent qu'une migration genétique s'effectue de l'Atlantique vers la Mediterranée, les individus passant le detroit de Gibraltar dans des eaux a 14° aides par le courant d'Est. Ce courant atlantique vehicule une eau légere et très mobile. Il se divise en deux branches, l'une longeant les côtes nord-africaines et l'autre remontant vers les Baléares puis la Corse (fig. 3). Le thon suit ces courants, les geniteurs se rassemblant en mer Tyrrhenienne et les plus petits individus montant vers le Nord, leur avance n'etant limitee que par la borne inferieure de temperature dans laquelle, en fonction de l'âge, ils peuvent evoluer.

La localisation plus precise des bancs de thon rouge semble liee aux mêmes structures frontales qui induisent

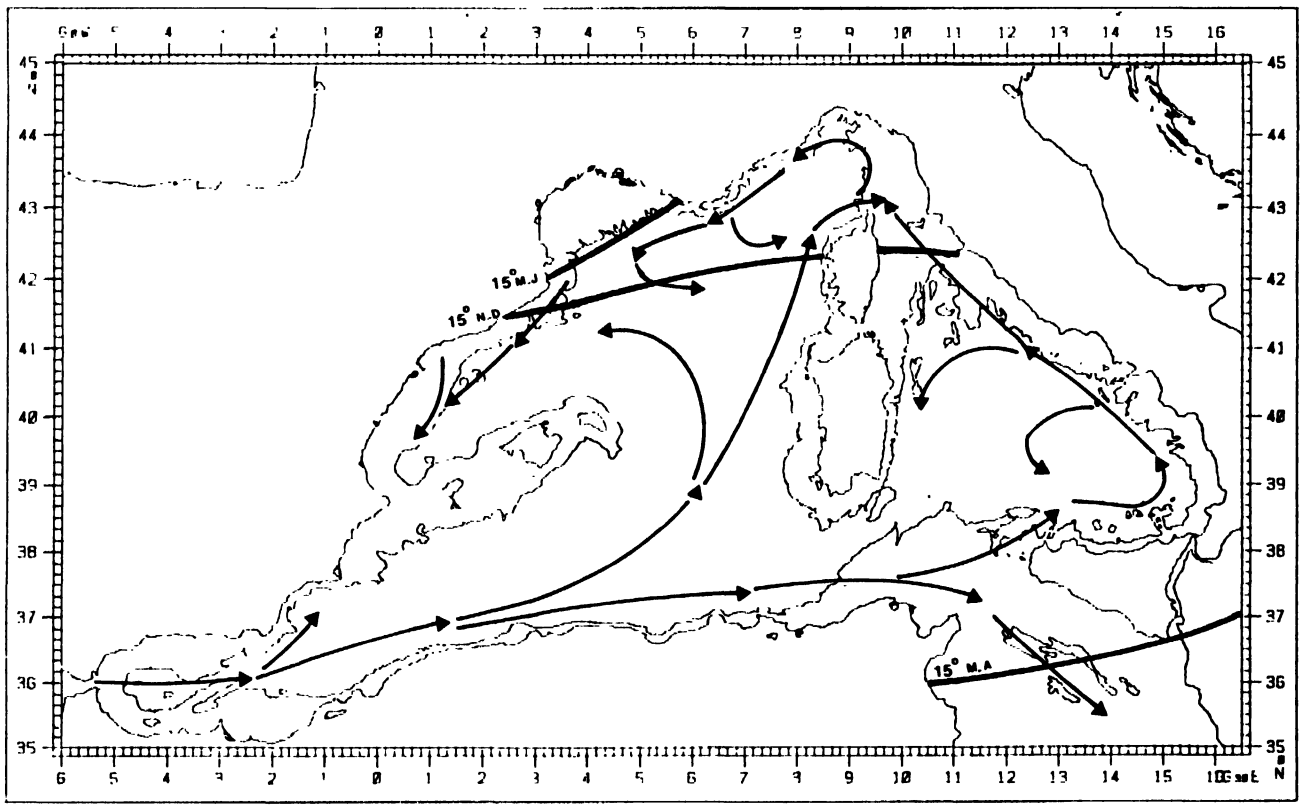


Fig. 3 — Circulation superficielle d'ete interessant les migrations du thon rouge et position de l'isotherme 15°

la présence du germon en Atlantique. Ces structures sont davantage dues en Mediterranee au regime des vents dominants et aux zones de contact entre les eaux fluviales et les eaux maritimes (Caraux, 1985). Ainsi, par mistral, des zones d'upwellings côtiers decrits par Alain (1969) et plus recemment par Millau (1981) se forment le long des côtes Nord de la Méditerranee occidentale, creant des secteurs d'eutrophisation puis de présence de petits pelagiques et enfin de thons.

Les thons immatures apparaissent en juillet dans les pêcheries du golfe de Gênes. Ils se deplacent ensuite le long de la region Provence-Côte d'Azur et se retrouvent au large du golfe du Lion puis redescendent en latitude à l'automne. Certains thons semblent rester en Mediterranée alors qu'une partie migre en Atlantique par le détroit de Gibraltar.

En Atlantique,l'environnement hydroclimatique est le même que pour le germon (cf. fig. 2 et texte). Le thon rouge remonte l'ete le long des côtes du Portugal, pénetre dans le golfe de Gascogne ou continue à monter vers la Norvege. Il redescend dans la baie ibero-marocaine a l'automne et y passe l'hiver.

Si le thon rouge semble s'affranchir davantage des temperatures que le germon, sa presence reste inféodee aux phénomènes de production planctoniques concentrant les cephalopodes et petits pelagiques. La teledetection parait donc pouvoir apporter une aide a la localisation si l'information peut être traitee en temps réel. Les parametres a collecter sont les mêmes que pour le germon mais on ne dispose actuellement que de la donnee température en temps quasi réel.

1.2. Rappels sur le germon du Pacifique Nord

Le germon est une espece de thon à très large repartition dans le Pacifique Nord. Il y a une tres assez vaste séparation selon l'âge des individus entre les immatures, âges de 2 a 5 ans, essentiellement repartis entre les latitudes 30° à 50° N et les geniteurs, âges de plus de 5 ans, répartis approximativement de 10° à 20°N. Les germons immatures peuvent réaliser de vastes migrations trans-océaniques dans les eaux tempérees subtropicales entre la bordure est, ouest et le Pacifique central nord. Par contre, les adultes geniteurs semblent n'effectuer que des mouvements limites essentiellement dans les regions tropicales et subtropicales du Pacifique Central et Ouest.

Cette ressource supporte plusieurs pêcheries commerciales importantes sur l'ensemble de son aire de repartition et dans le Pacifique Nord. Les captures moyennes annuelles dans cette zone durant les dix dernieres annees (1975-85) etaient de 76 350 tonnes métriques (Miyake and Bartoo, 1987). Pres de 83 % de ces captures sont realises par les pêcheries japonaises a la canne, palangre et filet maillant, exercees sur l'ensemble du Pacifique Nord. Pres de 16 % des captures proviennent des canneurs et ligneurs americains dans le Pacifique Nord-Est. Moins de 1 % des captures sont realisées par les pecheurs de Coree, Taïwan et Canada.

La migration, distribution, disponibilite et capturabilite du germon du Pacifique Nord sont nettement influencees par les variations de l'environnement oceanique et notamment par les fronts. Ceci est particulierement evident pour les immatures qui fournissent l'essentiel des pêcheries de surface du Pacifique Nord. Par exemple les zones de pêche du germon en surface dans le Pacifique Ouest sont directement liees aux fronts oceaniques (Uda, 1973). De même, les migrations saisonnières du germon à travers le Pacifique Nord et dans les eaux au large de l'Amerique du Nord sont associées à la zone de transition du Pacifique Nord et à ses limites frontales (Laurs and Lynn, 1977). De même, les grandes caractéristiques océaniques jouent un rôle important dans la distribution, la disponibilite et la capturabilité dans les eaux côtières au large de l'Amerique du Nord. Le germon tend a se concentrer sur les côtes chauds des fronts des up-welling côtiers et migrent loin de ces sites ou ces fronts se sont etablis lorsque les processus d'up-welling s'interrompent (Laurs *et al.*, 1977). En addition, les frontieres oceaniques associees a la plume de la Riviere Columbia peuvent jouer un rôle important dans la concentration du germon dans les eaux au large de la côte americaine du Pacifique Nord-Est (Pearcy and Mueller, 1970). Enfin, la majorite des germons capturés par la pêcherie U.S. est capturee dans des eaux dont la temperature de surface est comprise entre 15° et 20°C. Ceci est verifie, en depit du fait que le germon est le plus souvent concentre a une profondeur proche de la thermocline (Laurs et Dotson, en prepration), ou les temperatures sont le plus souvent nettement plus froides.

Les applications de la teledetection satellitaire a la recherche sur le germon du Pacifique Nord sont exposes dans la section 5.2. : Application de la deledetection satellitaire au germon du Pacifique Nord, *Thunnus alalunga* (Bonnaterre).

RÉFÉRENCES

ALAIN (Ch.), 1969. — Topographie dynamique et courants generaux dans le bassin occidental de la Méditerranee (golfe du Lion, mer Catalane, mer d'Alboran et ses abords, secteur a l'Est de la Corse). — Rev. Trav. Inst. Pêches marit., 24 (1) : 121-145.

ALONCLE (H.), 1964. — Note sur le thon rouge de la baie ibéro-marocaine. — Bull. Inst. Pêches Maroc. 12 : 43-59.

ALONCLE (H.) et DELAPORTE (F.), 1973. — Donnees nouvelles sur le germon *Thunnus alalunga* Bonnatere 1788 dans le nord-est Atlantique. — Rev. Trav. Inst. Pêches marit., 37 (4) et 38 (1).

ALONCLE (H.), 1978. — Donnees numeriques sur les petits thons rouges *T. thynnus* capturés sur le plateau continental marocain. — ICCAT, Rec. Doc.scient., VIII (2) : 324-328.

ALONCLE (H.) et DELAPORTE (F.), 1980. — Prospection germoniere dans l'Ouest atlantique et le large des côtes françaises. — Science et Pêche n° 300 : 1-6.

BARD (F.X.), 1981. — Le thon germon de l'ocean Atlantique. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences naturelles. — Université Pierre et Marie Curie, Paris, 6, 330 p.

BEARDSLEY (G.L.), 1969. — Proposed migrations of albacore *Thunnus alalunga* in the Atlantic ocean. — Trans. Am. Fish. Soc., 98 (4) : 589-598.

CARAUX (D.), 1985. — Traitement de données satellitaires pour l'étude des structures frontales du golfe du Lion. — Thèse Doc. Etat, Univ. Sci. et Tech. du Languedoc.

FARRUGIO (H.), 1981. — Exploitation et dynamique des populations de thon rouge *Thunnus thynnus* Linné (1758) atlanto-méditerranéennes. — Thèse Doc. Etat Univ. Sci. et Tech. du Languedoc.

FURNESTIN (J.) et DARDIGNAC (J.), 1962. — Le thon rouge du Maroc atlantique *Thunnus thynnus* L. — Rev. Trav. Inst. Pêches marit., 26 (4) : 381-406.

KOTO (T.), 1969. — Studies on albacore. Distribution and movement of the albacore in the Indian and the Atlantic Oceans based on the catch statistics of japonese tuna longline fishery. — Bull. Far. Seas Fish. Res. Lab., 1 : 115-129.

LE GALL (J.Y.), 1976. — Contribution a l'etude de la dynamique des populations du thon blanc ou germon *(Thunnus alalunga)* Insertion dans une pêcherie plurispecifique : la pêche palangriere thoniere dans l'Atlantique (1956-1973). — These de Doctorat d'Etat, Universite de Marseille, 80 p.

LOZANO CABO (L.), 1959. — Application des echosondeurs a l'étude des migrations des thons. — Proc. Gen. Fish. Coun. Medit., 5 : 101-104.

MILLAU (C.), 1981. — La dynamique marine du plateau continental du golfe du Lion en eté. — These Doc. Etat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6.

NISHIKAWA (Y.), KIKAWA (S.), HONMA (M.) et UEYANAGI (S.), 1978. — Distribution atlas of larval tunas, billfishes and related species. Result of larval surveys by R/V Shunyo Maru and Shoyo Mara (1956-1975). — Far. Seas Fisheries Research Laboratory Series, 9 : 1-194.

PICCINETTI (C.), PICCINETTI MANFRIN (G.) et DI-CENTA (A.), 1981. — Nouvelles données sur la reproduction des thonidés en Mediterranée. — Rapp. Comm. int. Mer Médit., 27 (5).

RIVAS (L.R.), 1977. — Preliminary models of annual life history cycles of the north atlantic bluefin tuna. — In Sharp et Dizon (1978).

SHARP (G.D.), DIZON (A.E.), 1979. — The Physiological ecology of tunas. — Academic Press, New York, 485 p.

2. Espèces et pêcheries concernées en zone intertropicale

2.1. Panorama des pêcheries de thonidés en Atlantique intertropical

par
Jean-Michel STRETTA et Michel PETIT
Oceanographes de l'ORSTOM
Centre ORSTOM
BP 5045
34032 MONTPELLIER Cedex
(France)

1. INTRODUCTION

Dans l'ocean Atlantique intertropical de 20°N a 20°S, trois especes de thons constituent l'essentiel des captures des canneurs, des senneurs et des palangriers. Ce sont :

- l'albacore *(Thunnus albacares)*
- le listao *(Katsuwonus pelamis)*
- le patudo *(Thunnus obesus)*

Dans l'Atlantique tropical oriental, la peche aux thons a caractere industriel a debute vers 1953 avec l'arrivee dans la region de Dakar au Senegal de canneurs français et espagnols. Vers 1960, ces bateaux se sont fixes definitivement a Dakar et Pointe-Noire au Congo tandis que les premiers senneurs les remplaçaient vers 1964 en se basant à Abidjan en Côte d'Ivoire (Bard, 1983, Fonteneau et Diouf, 1986).

En Atlantique, trois methodes de pêche dominent : la canne, la senne et la palangre.

– la peche a la canne consiste a pêcher des thons a l'aide d'une canne avec un appat vivant jete a la mer. L'hameçon est garni d'un poisson vivant puis d'un leurre artificiel.

– la peche a la senne consiste a encercler un banc de thon avec un filet appele « senne ». Cette senne est equipee d'une coulisse a sa base qui permet a la nappe de filet de couler et de se fermer. Le volume d'eau ainsi isole est reduit en une poche ou le thon est preleve. Cette technique est decrite et illustree par Stequert et Marsac (1983).

– la pêche à la palangre consiste a mouiller en pleine eau des lignes de plusieurs dizaines de kilometres de longueur sur lesquelles des hameçons sont regulierement disposes. Une palangre peut compter de 1 500 a 3 500 hameçons. L'appât utilise est un poisson beloniforme *(Cololabis saira* ou saury) en provenance de l'océan Pacifique et conservé congele a bord. Les palangres classiques sont mouillees à une profondeur qui varie entre 50 et 150 mètres. A partir de 1980, les Japonais ont introduit la palangre profonde qui est mouillee entre 50 et 250 metres. Cette palangre profonde est utilisée pour pêcher essentiellement les gros patudos.

2. EVOLUTION DES PRISES PAR ESPECES ET PAR ENGINS

2.1. Origine des données

Les tableaux I, II et III ainsi que la figure 1 presentent les prises annuelles des thonides majeurs en Atlantique par engin depuis 1975. Les donnees proviennent de l'ICCAT (1) (Anonyme, 1986). Nous garderons les repartitions des prises adoptees par l'ICCAT : les prises des albacores et des listaos sont presentées pour l'Atlantique est et ouest alors que pour le patudo elles sont presentees pour l'Atlantique nord et sud.

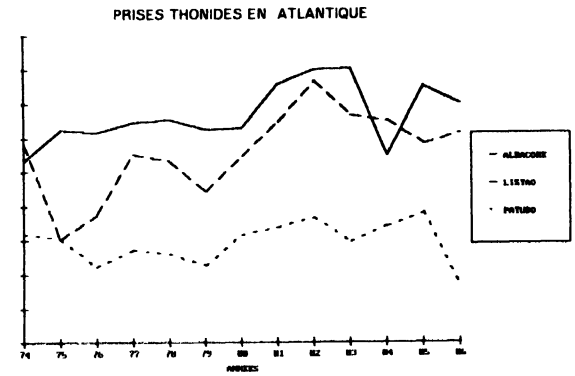


Figure 1 Prises de thonides en Atlantique de 1974 a 1986
Les valeurs de 1986 sont des valeurs estimees

2.2. Evolution des prises par espèces

2.2.1. Prises d'albacore

L'albacore est l'espece la plus recherchee dans l'Atlantique. Si de 1957 a 1962, la palangre est le principal engin de pêche de l'albacore, a partir de 1969 la majorite des prises se fait par les senneurs (cf. tableau I et figure 2a). En Atlantique est, de 1979 a 1982, les senneurs assurent 80 % des prises d'albacore. Les prises

(1) Commission Internationale pour la Conservation des Thonides en Atlantique (Madrid, Espagne).

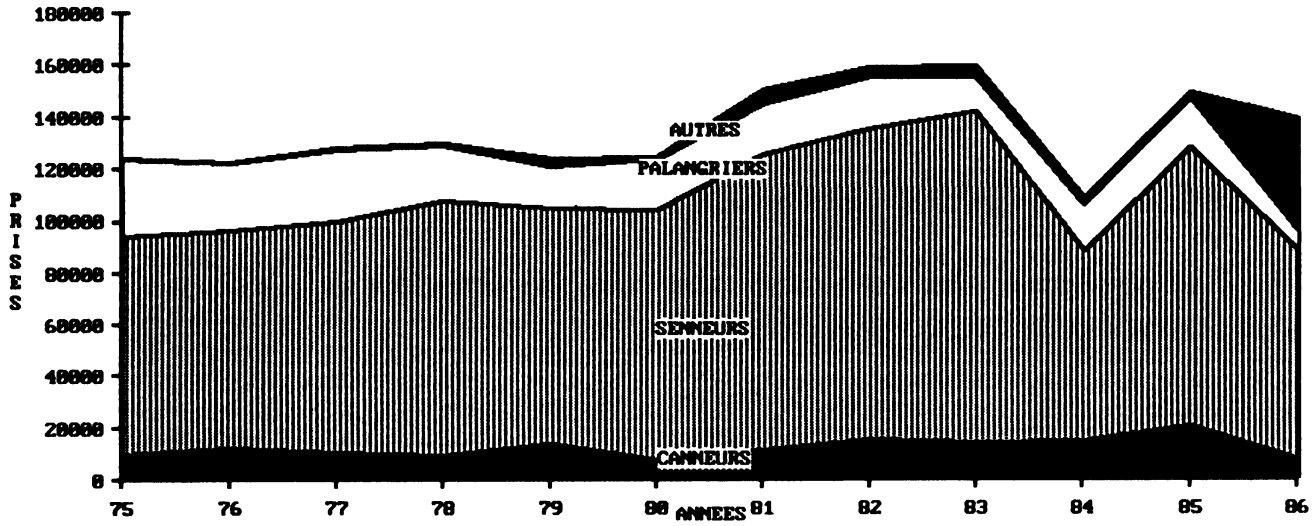


Figure 2a : Prises d'albacore par engin pour l'Atlantique tropical est et ouest

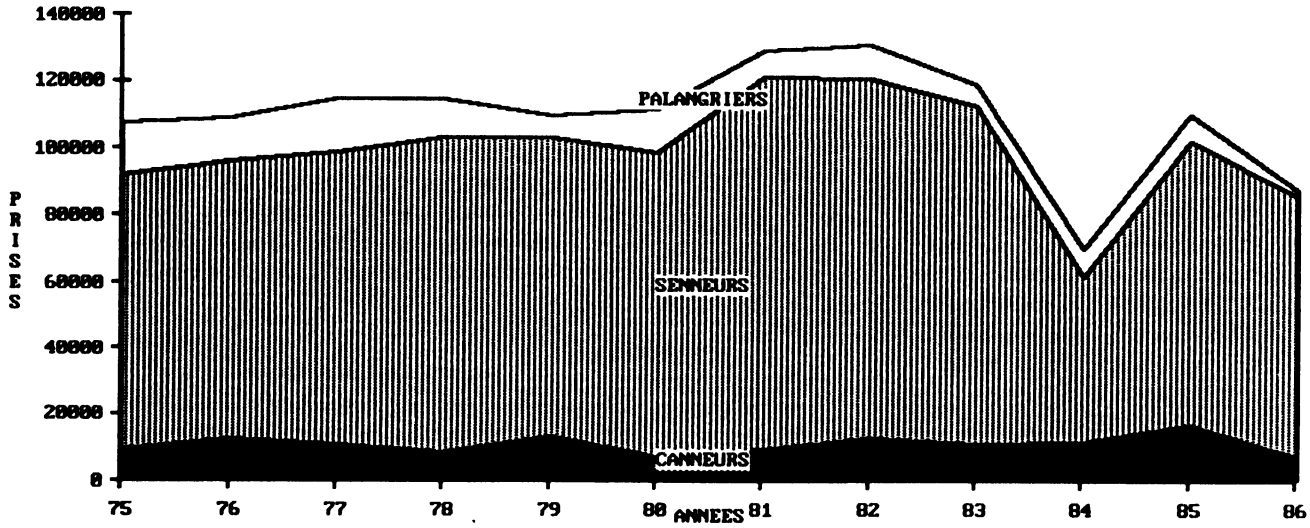


Figure 2b : Prises d'albacore par engin pour l'Atlantique tropical est

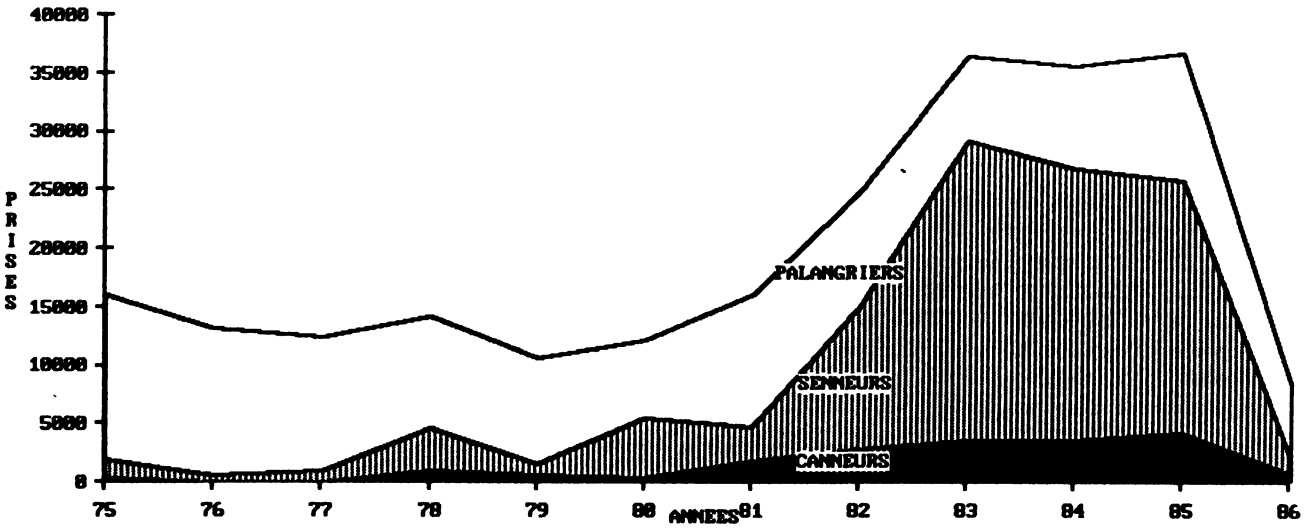


Figure 2c : Prises d'albacore par engin pour l'Atlantique tropical ouest

ANNEE	CANNEURS	SENNEURS	PALAN-GRIERS	AUTRES	TOTAL
1975	10054	84544	29573	419	124590
1976	12786	84279	25379	542	122986
1977	10935	89417	26994	1399	128745
1978	9992	98274	20804	1418	130488
1979	14311	90913	15790	3793	124806
1980	7947	96936	19135	1418	125436
1981	11695	114562	19289	5674	151222
1982	16173	120060	19760	3807	159805
1983	14912	127640	13377	4569	160498
1984	15653	73215	17511	2974	109353
1985*	21259	107355	18978	2501	150093
1986*	8120	80528	7887	43488	140023

* Valeurs estimées

TABLEAU I: Prises d'albacore en Atlantique est et ouest.

croissent rapidement et régulièrement jusqu'en 1982. A partir de cette date, le fait marquant est la chute des prises d'albacore essentiellement dans l'Atlantique est (cf. figure 2b). Cette chute qui s'etend jusqu'en 1984 a contraint un certain nombre de grands senneurs des flottilles thonières FIS (2) et espagnoles a migrer dans l'océan Indien. L'effort de pêche est tombe a 2 969 jours de mer en 1984 (cf. figure 3). A l'heure actuelle, il semblerait que le stock d'albacore soit en phase de recuperation rapide (Fonteneau et Diouf, 1987). Cette reconstitution du stock a-t-elle pour origine la baisse de la mortalite par pêche exercee par les senneurs ? Malgre un effort moindre, la prise totale d'albacore en Atlantique est voisin de ce qu'il etait en 1981-1982.

Un autre point marquant est l'essor des pêcheries de surface d'albacore en Atlantique ouest depuis 1981. Les prises qui sont inferieures a 5 000 tonnes avant 1981 atteignent pres de 45 000 tonnes en 1983. Cet essor est le fait de l'augmentation du nombre de senneurs (cf. figure 2c).

(2) Flottille française, ivoirienne et senegalaise.

2.2.2. Prises de listao

En Atlantique est, l'essor des pêcheries de listao est relativement recent. Elles ont débute a partir de 1970 (Fonteneau et Diouf 1986). En 1977 et 1978 et surtout à partir de 1980, les prises de listaos dépassent les 100 000 tonnes avec une prise record en 1982 avec plus de 155 000 tonnes (cf. tableau II et figures 4a et 4b).

ANNEE	CANNEURS	SENNEURS	PALAN-GRIERS	AUTRES	TOTAL
1975	19276	35726	214	5286	60502
1976	31505	33197	48	9994	74744
1977	44878	56499	134	8538	110049
1978	44173	60203	56	1741	106173
1979	49000	37066	13	2218	88297
1980	47420	57061	12	4319	108812
1981	56906	69213	78	2759	128956
1982	66882	82043	41	4072	153038
1983	54807	74687	624	2873	132991
1984	46352	81382	75	2106	129915
1985*	55927	60004	77	676	116433
1986*	28665	55442	74	38643	122824

* Valeurs estimées

TABLEAU II: Prises de listao en Atlantique est et ouest.

Comme pour l'albacore, les prises de listao en Atlantique ouest augmentent rapidement dès 1979 : pour les canneurs, leurs prises sont multipliées par 10 entre 1978 et 1985 et pour les senneurs, elles sont multipliees par 7 entre 1978 et 1984 (cf. figure 4c).

2.2.3. Prises de patudo

Les pêcheries de patudo debutent de façon significative en 1960. Depuis 1971, les prises de patudo, bien que tres nettement inferieures a celles d'albacore et de

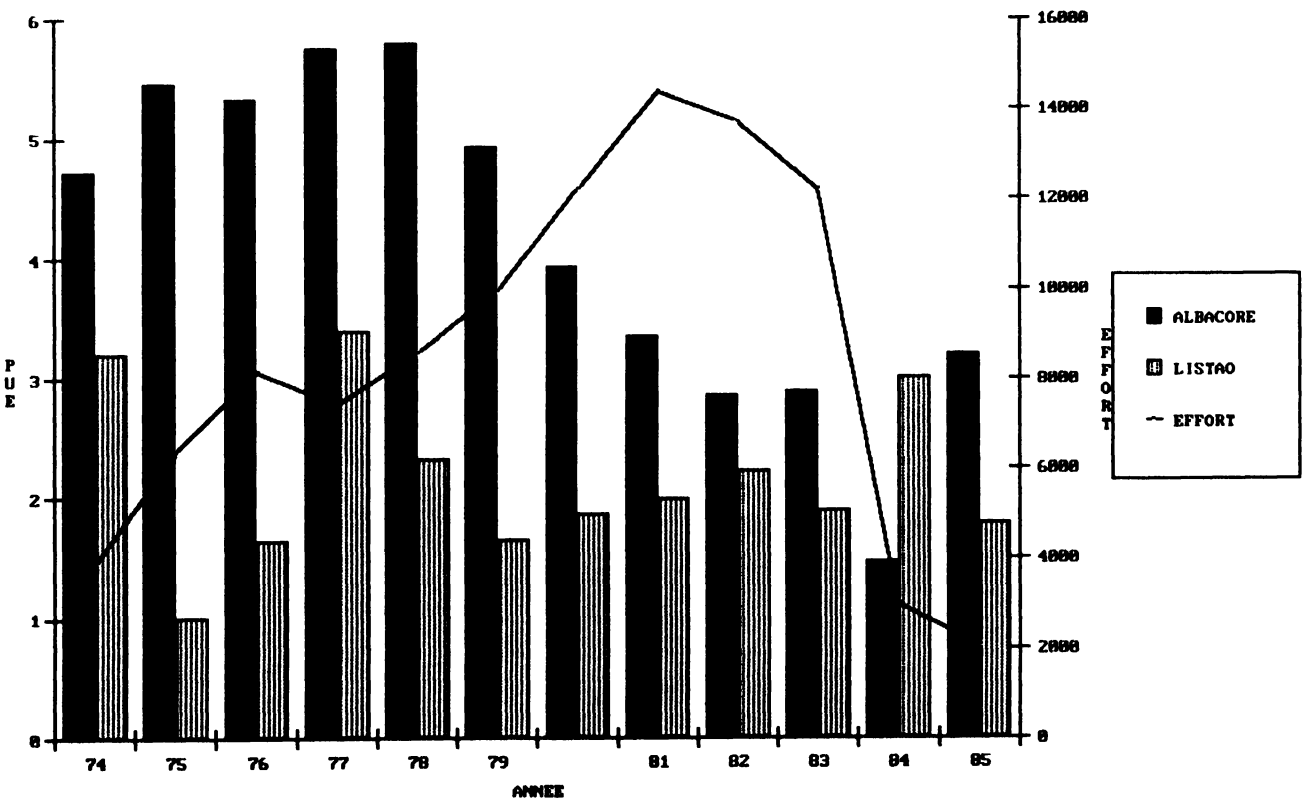


Figure 3 : Prises par unite d'effort (PUE) et effort en jours pour la flottille thoniere FIS (Française, Ivoirienne et Senegalaise)

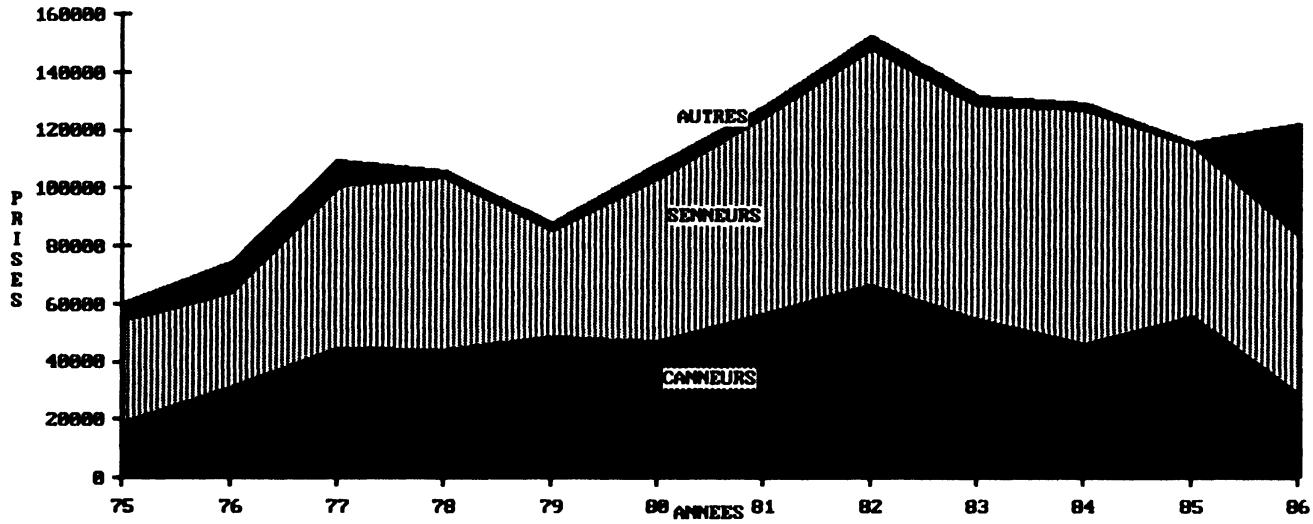


Figure 4a . Prises de listao par engin pour l'Atlantique tropical est et ouest

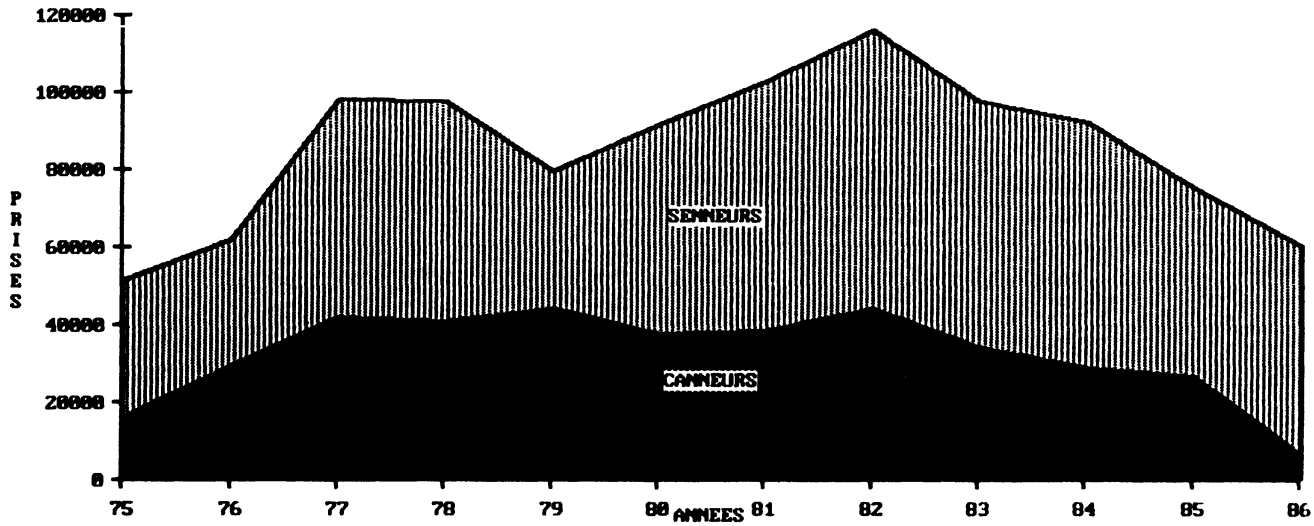


Figure 4b : Prises de listao par engin pour l'Atlantique tropical est

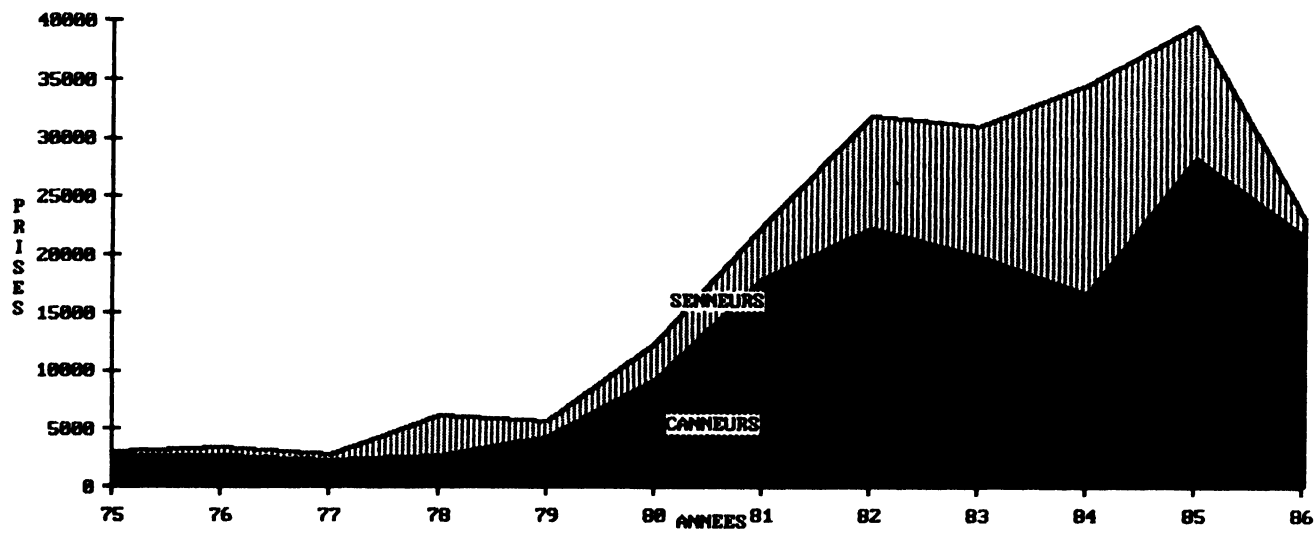


Figure 4c : Prises de listao par engin pour l'Atlantique tropical ouest

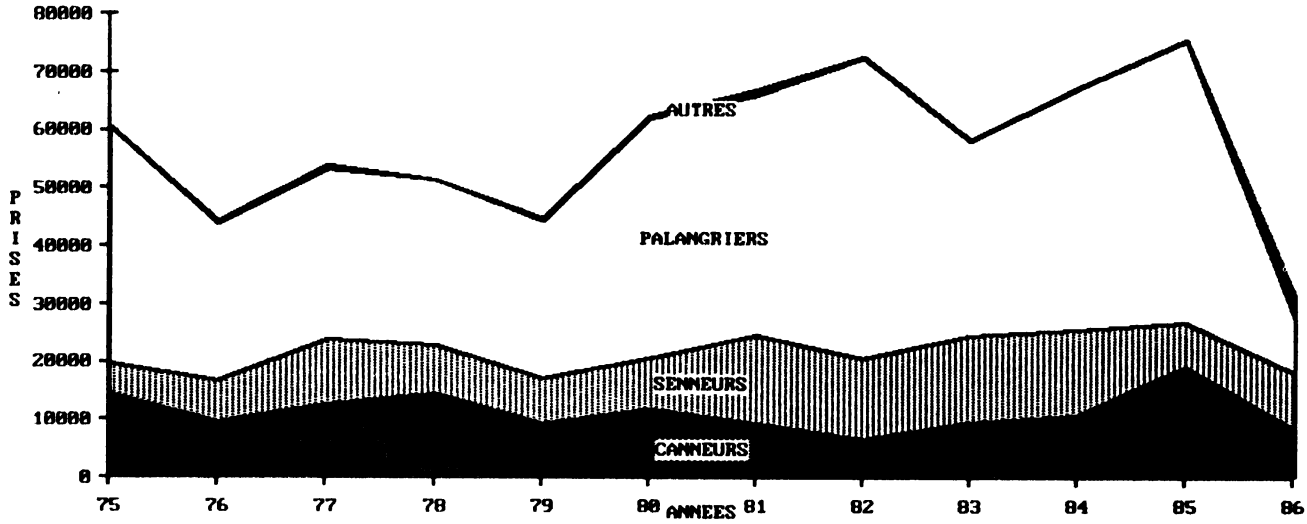


Figure 5a - Prises de patudo par engin pour l'Atlantique tropical nord et sud

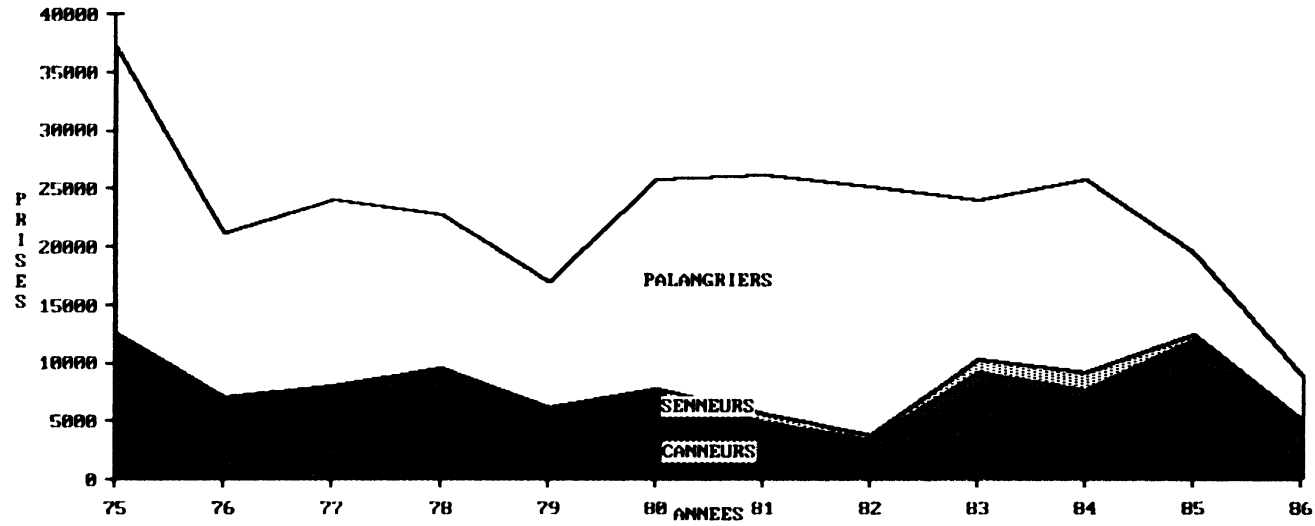


Figure 5b - Prises de patudo par engin pour l'Atlantique tropical nord

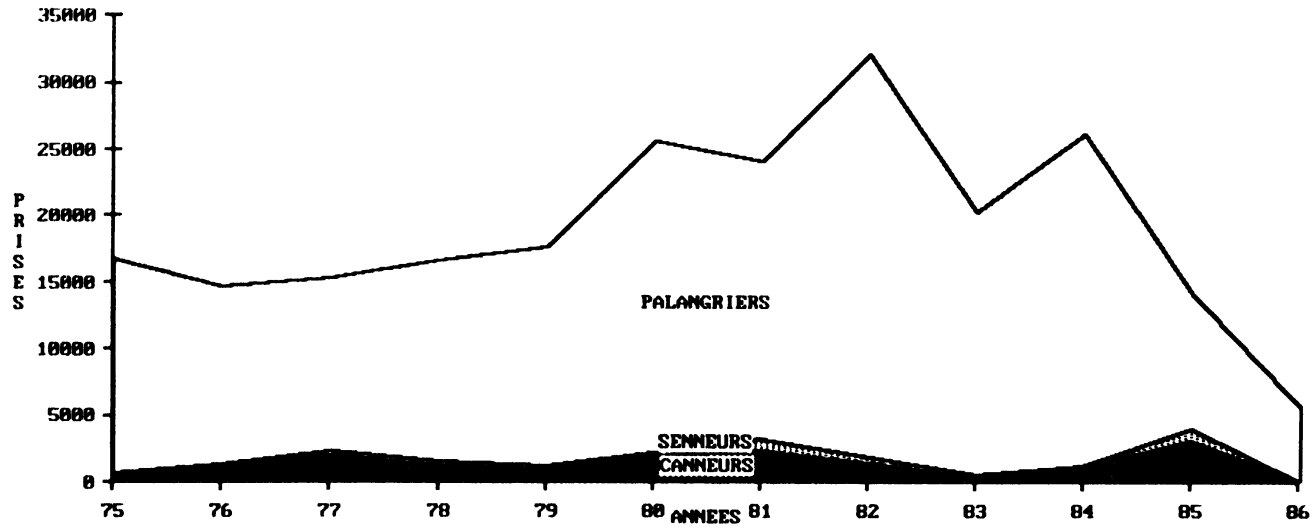


Figure 5c - Prises de patudo par engin pour l'Atlantique tropical sud

listao, dépassent toutefois les 40 000 tonnes par an avec un maximum de 76 000 tonnes en 1985. La part des palangriers dans les prises de patudos est prépondérante : de 1975 à 1985, elle varie de 64 à 71 % (cf.

ANNEE	CANNEURS	SENNEURS	PALAN-GRIERS	AUTRES	TOTAL
1975	14640	5259	40781	0	60680
1976	9931	6858	27382	450	44621
1977	12752	11509	29136	716	54113
1978	14623	8647	28283	174	51727
1979	9484	7966	27195	481	45126
1980	12094	8694	41362	589	62739
1981	9680	15229	41412	798	67119
1982	6918	13999	51799	287	73003
1983	9731	15160	33475	232	58598
1984	11074	14779	41670	238	67761
1985*	19347	7822	48644	203	76016
1986*	8606	9921	9447	3791	31765

* Valeurs estimées

TABLEAU III: Prises de patudo en Atlantique nord et sud.

tableau III et figure 5a). En Atlantique sud, les engins de surface pêchent moins de 5 000 tonnes de patudo (cf figure 5c). Quant à la part des senneurs, elle augmente régulièrement (jusqu'au départ d'une partie de senneurs en 1985). Toutefois, ces chiffres demeurent sujets à caution du fait de la difficulté d'identifier les petits patudos dans les prises (Fonteneau et Diouf, 1986).

2.3. Evolution des prises par engin

Nous prendrons pour analyser les prises par engin, celles de deux principales flottilles thonières opérant en Atlantique : les flottilles FIS (Cayré *et al.*, 1987) et espagnoles (Garcia Mamolar et Fernandez Gonzalez, 1987) qui représentent à elles deux 58 à 70 % des prises d'albacore entre 1975 et 1985.

2.3.1. Prises de canneurs FIS

L'effort des canneurs FIS dans l'Atlantique est relativement stable depus une dizaine d'années; il oscille depuis 1976 entre 2 200 et 2 800 jours de pêche par an (cf. figure 6a). Pour l'albacore, la prise par unité d'effort (PUE) varie de 0,8 t à 1,4 t/jour alors que pour le listao, elle varie de 0,8 t à 1,7 t/jour. Les canneurs n'ont pas été affecté par la chute générale des prises d'albacore entre 1983 et 1984. Dans un contexte d'abandon des lieux de pêche en Atlantique par les senneurs, la PUE des canneurs a même augmenté de 40 % entre 1983 et 1984 pour baisser de 20 % entre 1984 et 1985.

2.3.2. Prises des senneurs FIS

2.3.2.1. Prises des moyens senneurs (3)

Si l'on examine la figure 6b présentant la PUE et l'effort de pêche des moyens senneurs, on remarque tout d'abord un effondrement total de l'effort de pêche de cette catégorie de thonier. L'effort passe de 5 900 jours de pêche en 1974 à 0 en 1985. Jusqu'en 1983, la PUE d'albacore des moyens senneurs est relativement stable (mise à part une PUE très élevée en 1980) alors que le nombre de ce type de thonier décroissait. En revanche pour le listao, la PUE a énormément variée ces dix dernières années.

(3) Senneur de capacité de transport inférieure à 300 t.

2.3.2.2. Prises des grands senneurs (4)

De 1974 à 1981, l'effort de pêche des grands senneurs de la flottille FIS s'accroît régulièrement en passant de 3 870 jours de mer (5) à 14 368 en 1981 (cf. figure 6c). De 1974 à 1978, malgré un effort de pêche en accroissant, la PUE décroît alors que l'effort de pêche est croissant de 1978 à 1981. Elle tombe à 1,48 t en 1983 : c'est devant ces chiffres en deça du seuil de rentabilité de ces navires qu'une majeure partie de la flottille FIS s'est déplacée dans l'océan Indien (cf. figure 6c).

Pour le listao, la PUE est depuis 1977 relativement stable, elle oscille autour de 2 tonnes. Il est à noter qu'en 1984 la PUE de listao augmente de façon notable alors que celle de l'albacore s'effondrait.

2.3.3. Prises des senneurs de la flottille espagnoles

Pour la flottille thonière espagnole, nous ne disposons de statistiques précises que depuis 1979. En examinant la figure 7, on relève tout d'abord que l'effort de la flottille espagnole ne s'est pas effondré en 1984. Il a certes diminué car quelques senneurs espagnols ont aussi quitté l'Atlantique pour l'océan Indien, mais en 1984, il était proche de celui de 1982. La PUE pour l'albacore est élevée : elle atteint même plus de 7 tonnes en 1981 pour atteindre la valeur de 4,36 t en 1984 au plus fort de la crise thonière Atlantique. Il est un point important à souligner : les PUE d'albacore et de listao sont depuis 1979 toujours plus élevées pour les senneurs espagnols que pour les senneurs FIS (cf. figures 8a et 8b). Cette différence dans le rendement de ces deux flottilles mérite que l'on s'y intéresse.

2.3.4. Comparaison des PUE des flottilles FIS et espagnole

Avant d'analyser les PUE de ces deux flottilles, il faut tout d'abord noter que ces deux flottilles ne travaillent pas de conserve, mais cependant elles exploitent le même gisement. La question qui se pose est de savoir à quoi faut-il attribuer ces différences alors que l'effort de pêche des français est supérieur à celui des espagnols (cf. figure 8c) jusqu'à la crise de 1983 ?

- à la technique de pêche : la durée d'une calée nulle ou d'une calée d'un même tonnage est beaucoup plus courte pour un thonier espagnol que pour un thonier FIS (Fonteneau et Diouf 1986).
- à la stratégie de pêche : depuis 1981, les thoniers FIS ont accentué leur effort de recherche et de pêche sur le listao au détriment de l'albacore.
- au comportement de groupe entre pêcheurs FIS et espagnols ? Bien qu'il ne soit pas d'usage de répondre à une question par une nouvelle question, cette notion de comportement (sans qu'elle soit prouvée et quantifiée) ne doit pas être omise.

3. RELATIONS ENTRE LES THONS ET LES PARAMETRES DE L'ENVIRONNEMENT

3.1. Historique

L'étude de l'environnement des thons dans l'océan Atlantique tropical et plus précisément dans le golfe de Guinée a véritablement débuté par les travaux de Postel

(4) Senneur de capacité de transport supérieure à 300 t.

(5) L'effort annuel brut est le temps de pêche total standardisé en jour de mer pour les senneurs de catégorie 5 (Cayre *et al.*, 1986).

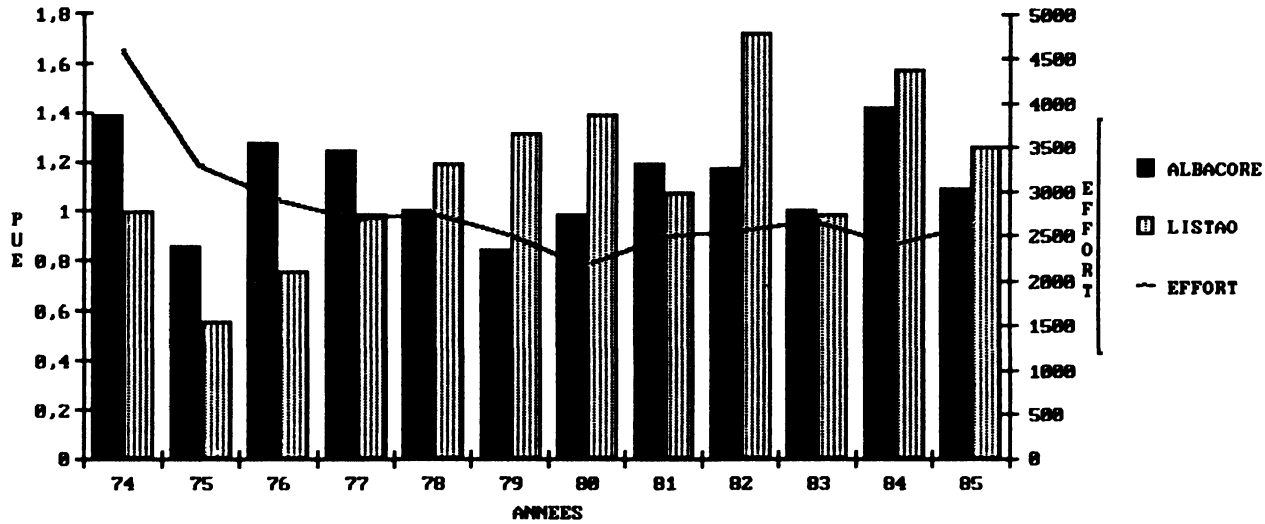


Figure 6a : Prises par unite d'effort (PUE) et effort en jours pour les canneurs de la flottille thoniere FIS (Française, Ivoirienne et Senegalaise)

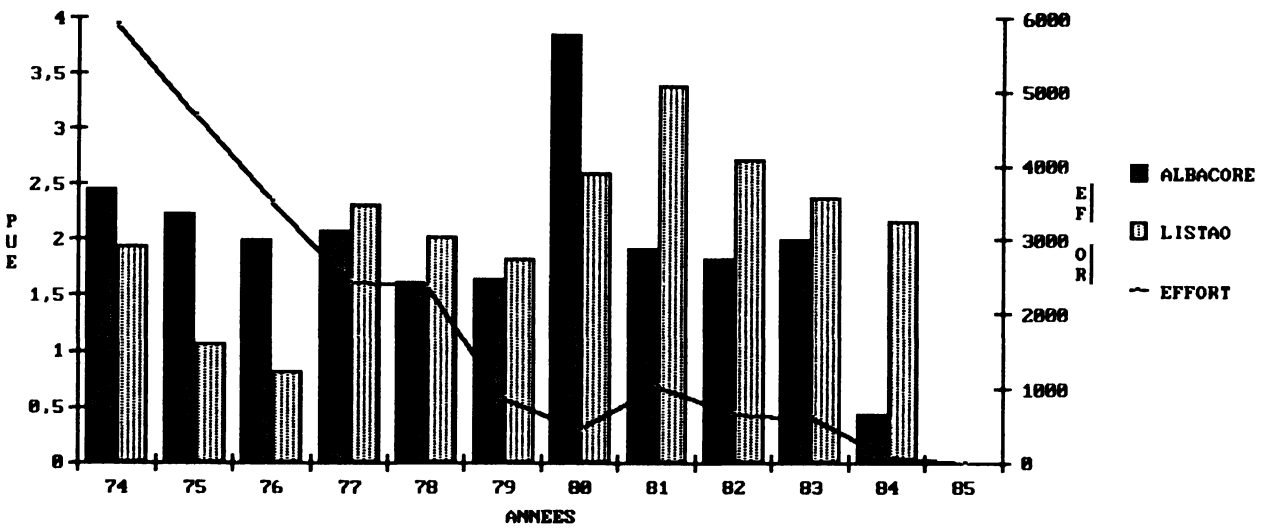


Figure 6b : Prises par unite d'effort (PUE) et effort en jours pour les moyens senneurs de la flottille thoniere FIS (Française, Ivoirienne et Senegalaise)

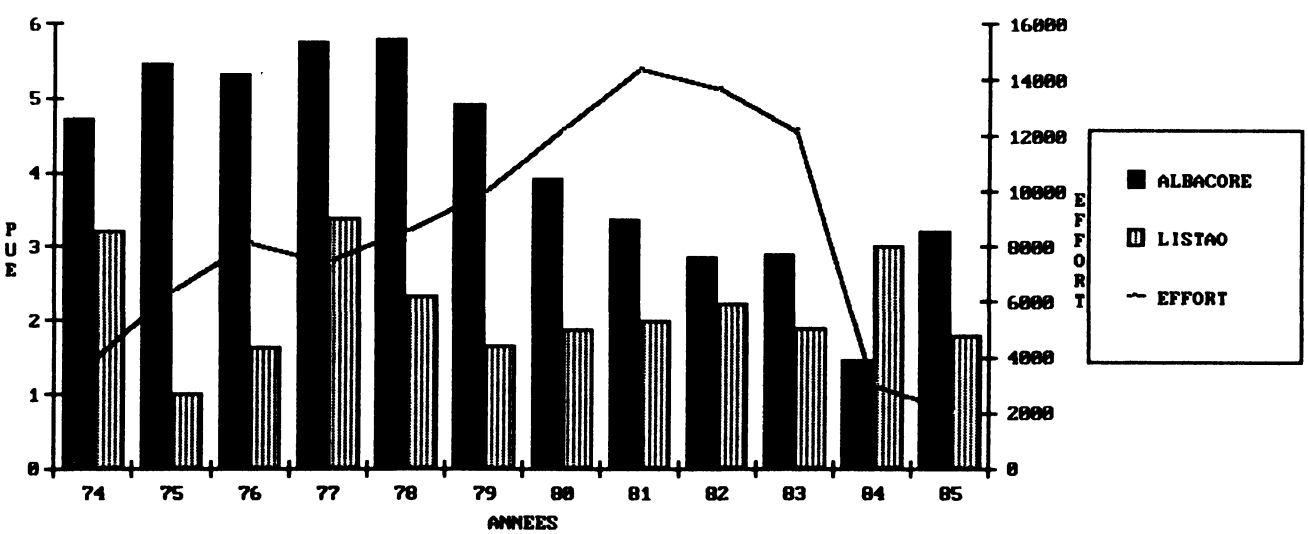


Figure 6c : Prises par unite d'effort (PUE) et effort en jours pour les grands senneurs de la flottille thoniere FIS (Française, Ivoirienne et Senegalaise)

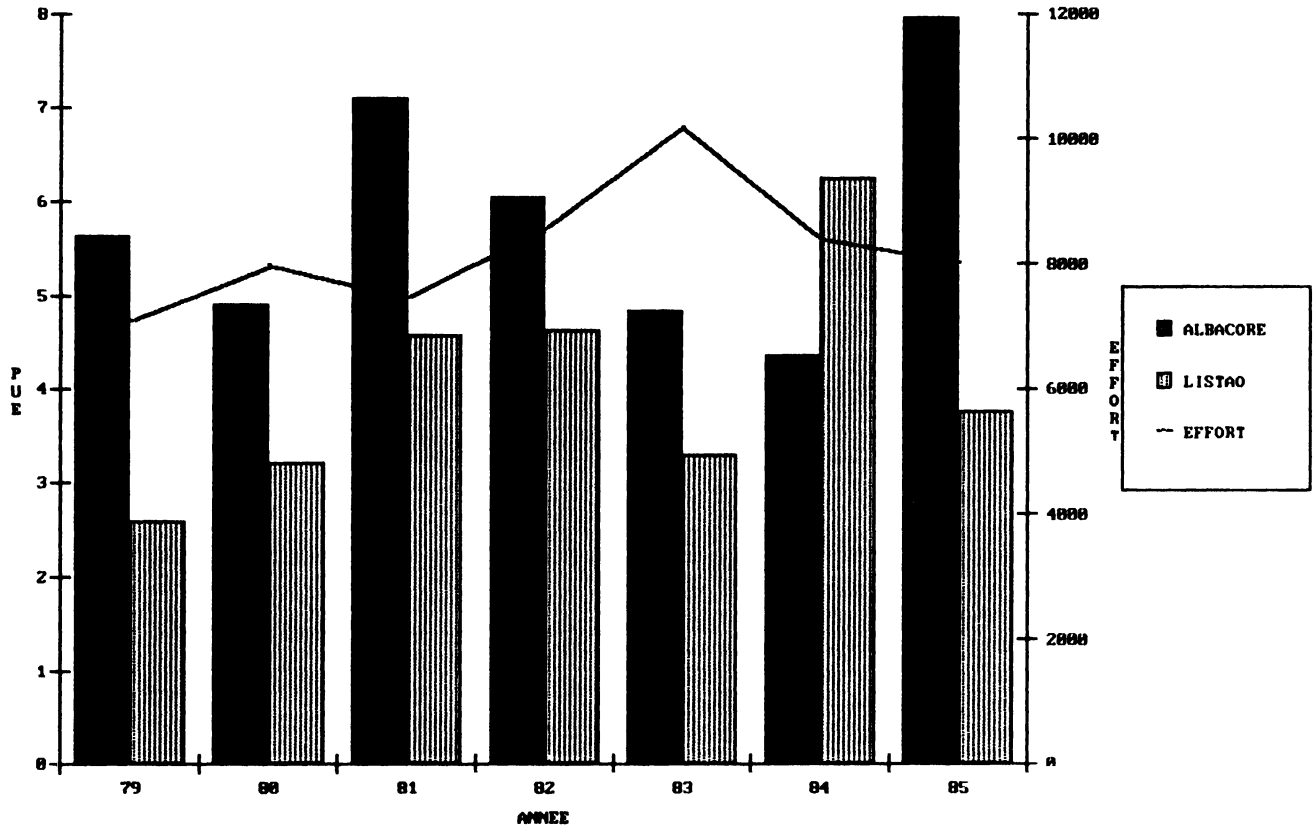


Figure 7 : Prises par unite d'effort (PUE) et effort en jours pour la flottille thoniere espagnole

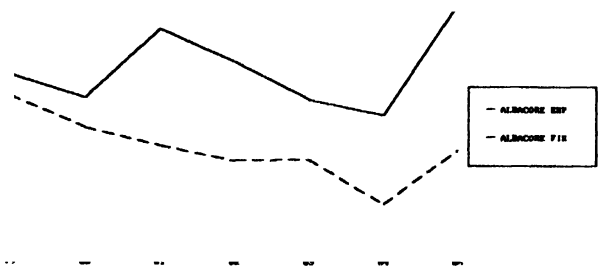


Figure 8a : Comparaison des prises par unite d'effort de peche (PUE) d'albacore entre les flottilles FIS et espagnole

Figure 8b : Comparaison des prises par unite d'effort de peche (PUE) de listao entre les flottilles FIS et espagnole

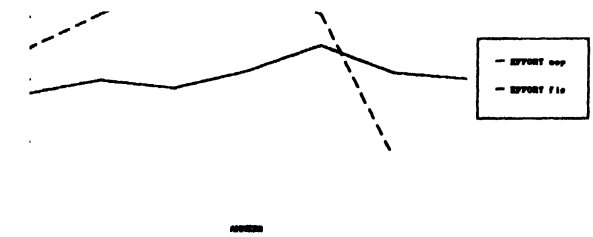


Figure 8c : Comparaison des efforts de peche entre les flottilles FIS et espagnole

(1955, 1955a) sur les thoniers Gerard Treca et Albacore. Postel a defini les aires de repartition des principales especes et defini les grandes lignes des relations des thons avec leur milieu. Par la suite, Bane (1963) a analyse les donnees de la campagne du Columbia en 1959-1960 sur les cotes africaines du Liberia a l'Angola. L'étude de la relation thon/environnement s'est poursuivie a l'ORSTOM par les travaux de Le Guen *et al.* (1965). Mais comme le soulignait Postel (1969), « les connaissances acquises sur la repartition et l'abondance des thons dans cette region du golfe sont dues beaucoup plus a l'analyse des donnees de la pêche commerciale qu'au depouillement des expeditions oceanographiques ».

Toutefois, les valeurs limites des parametres d'environnement generalement prises en compte pour l'etude de la distribution des thons sont evaluees essentiellement a partir des pêcheries de surface. En fait, en procedant de cette façon, on ne décrit pas la distribution des thons mais leur disponibilité et leur capturabilite vis-a-vis des engins de surface.

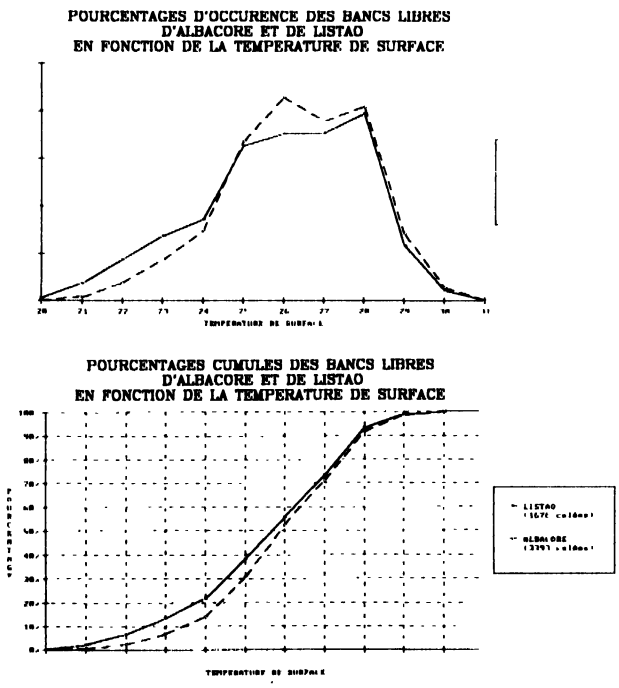
Parmi les parametres couramment utilises pour decrire l'environnement et la distribution des thons, la température et plus particulierement la temperature de surface a fait l'objet de nombreux travaux pour definir des preférendums thermiques où se rencontrent les differentes espèces de thonides. D'autres paramètres devront toutefois être aussi pris en compte : nous citerons la profondeur de la thermocline, le gradient de température au sein de la thermocline, l'oxygene dissous, la salinite, la vitesse du courant, l'etat du ciel, de la mer et la vitesse du vent. Enfin, de nombreux auteurs estiment que la nourriture va induire la distribution des

thons au sein des bornes definies par les parametres physiques et physiologiques (Blackburn 1965, 1969, Sund *et al.* 1981, Stretta, 1987).

3.2. Relation capturabilité/température de surface

3.2.1. Albacore

En Atlantique tropical oriental, Postel (1955) a fixe les limites thermiques de l'albacore a 21° et 28°C. Stretta et Slepoukha (1986) definissent une fourchette thermique de 20° a 31°C pour des calees ne contenant que de l'albacore (toutes classes de tailles confondues) et pêchees sans dispositif concentrateur de poissons. Le pourcentage d'occurence des bancs libres d'albacore par classe de température et le pourcentage cumule d'occurrence montrent que pour cette espece 69 % des calees ont lieu a une temperature egale ou superieure a 25.0°C (cf. figures 9a et 9b). Il est a noter que l'intervalle de température entre 20° et 31°C correspond sensiblement aux valeurs minimum et maximum rencontrees dans l'ocean Atlantique tropical.



3.2.2. Listao

Dans le golfe de Guinee, Bages et Fonteneau (1979) trouvent que le listao est pêche de 22° a 29°C, soit dans la même gamme thermique que l'albacore. Stretta et Slepoukha (1986) definissent une gamme thermique comprise entre 20° et 31°C. Le pourcentage d'occurence des bancs libres de listao par classe de temperature et le pourcentage cumule d'occurence montrent, comme pour l'albacore, que pour cette espece 62 % des calees ont lieu a une temperature egale ou superieure a 25.0°C (cf. figures 9a et 9b).

3.2.3. Patudo

En Atlantique tropical oriental, Pianet (1981) situe la preference thermique du patudo entre 20° et 29°C et un preferendum thermique entre 20° et 22°C pour les patudos pêches par des engins de surface le long des côtes entre le cap Lopez et l'Angola. Les palangres profondes actuellement utilisees exploitent preferentiellement les patudos dans les eaux dont la température est comprise entre 10 et 15°C.

3.3. Relation thon/autres paramètres d'environnement

Dans la recente synthese sur les thonides dans le golfe de Guinee, Stretta (1987) passe en revue les principales relations entre les thons et les principaux parametres de l'environnement : thermocline, gradient thermique dans la thermocline. Parmi ces parametres, nous retiendrons que la salinite de l'eau de mer ne semble pas avoir d'effet direct sur les thons (Blackburn, 1965, Sund *et al.*, 1981) et qu'en revanche, la teneur en oxygene dissous de la masse d'eau, joue un rôle important dans la physiologie des thons. Sharp (1978) situe les besoins minimums en oxygene a 1,5 ml/l pour l'albacore et a 0,5 ml/l pour le patudo. Barkley *et al.* (1978) propose la valeur de 5ppm (env. 3,5 ml/l) d'oxygene dissous comme valeur limite a utiliser pour l'elaboration de modele de distribution pour le listao.

3.4. Relation thon/productivité des eaux

3.4.1. Les processus d'enrichissement

Il est classiquement admis que dans l'ocean Atlantique tropical la production nouvelle est faible a l'exception des zones ou les conditions du milieu amenent en surface des sels nutritifs en quantite abondante (Herbland *et al.*, 1983). Ce qui conditionne la richesse d'une zone, c'est l'intensite de la production nouvelle qui s'elabore a partir du nitrate provenant de l'eau profonde. Cependant, il existe en Atlantique tropical differents processus d'enrichissement des masses d'eaux : les dômes de Guinee et d'Angola, la crête thermique equatoriale en saison chaude centree entre 2° et 3°S, la divergence equatoriale en saison froide et les upwellings côtiers classiques lies au vent que l'on rencontre le long des côtes du Senegal au nord, le long des cotes du Ghana et de la Côte d'Ivoire et le long des côtes du Gabon, du Congo et de l'Angola entre le cap Lopez et le cap Frio.

Ces zones d'enrichissement ont un point commun : celui des mouvements verticaux de la thermocline dans la couche euphotique. Les zones de remontee des elements nutritifs dans la couche euphotique sont le siege de processus de fertilisation de la masse d'eau (Margalef, 1978).

3.4.2. Zooplancton et micronecton

Brandhorst (1958) souligne qu'un des facteurs les plus importants influençant l'agregation de poissons pelagiques dans les eaux tropicales est la presence de nourriture tributaire de la production du phytoplancton. Dans le Pacifique tropical oriental, cet auteur trouve une relation inverse entre la profondeur de la thermocline et la quantite de zooplancton. De plus, cette quantite de zooplancton parait être reliee dans quelques regions a l'abondance des thons.

Dans l'Atlantique tropical oriental, Le Borgne *et al.*, (1983) trouvent que la biomasse de zooplancton est d'autant plus élevé que la couche homogene superficielle est mince, donc que la thermocline est plus proche de la surface. Parallèlement à cette augmentation de la biomasse de zooplancton, ces mêmes auteurs évoquent egalement la « possibilité pour le micronecton, lors d'un accroissement de la biomasse phytoplanctonique, d'augmenter la part d'algues dans leur ration au detriment des autres particules : d'un régime omnivore, ils pourraient passer à un regime franchement phytophage ». Cette variation du regime alimentaire peut s'accompagner également d'un court-circuit de la chaine alimentaire. Ce type de court-circuit de la chaine alimentaire est observé au large de la Basse Californie par Blackburn (1969). Dans l'Atlantique, au large de la Côte d'Ivoire, cette possibilité de court-circuit de la chaine alimentaire est évoquée par Stretta et Petit (sous presse).

3.4.3. Relation thon/nourriture

Dans le golfe de Guinee, Dragovich (1970) decrit la chaine trophique qui aboutit aux thons en analysant les contenus stomacaux des poissons ingérés par les albacores et les listaos. Les resultats de cette etude confirment la dépendance de ces organismes-proies envers le macrozooplancton. Les copepodes dominent dans le bol alimentaire des poissons ingeres.

En conclusion, les paramètres d'environ que nous venons d'evoquer : la temperature de surface, la teneur en oxygene dissous, la profondeur de la thermocline et la nourriture disponible, doivent être consideres dans leur ensemble car c'est le parametre d'environnement qui sera proche de la valeur critique pour une espece, a une taille et a un niveau physiologique donnes qui deviendra le facteur limitant pour le deplacement des thons.

4. ESSAI DE SYNTHESE

A partir des prises d'albacore et de listao de la flottille thoniere FIS (PUE par quinzaine) et des données d'environnement (moyennes par quinzaine de la temperature de surface et des composantes zonale et méridionale de la vitesse du vent) de 1969 a 1979, Mendelssohn et Roy (1986), montrent que ces parametres d'environnement se révelent être des precurseurs des mecanismes oceanographiques qui sont a l'origine de conditions favorables de pêche. Ces auteurs pensent que ces mécanismes impliquent l'apparition d'upwellings et de concentrations de sels nutritifs un mois avant la période de pêche.

Dans le Pacifique tropical occidental, la faune migrante (qui vit de jour en profondeur et ne vient dans les couches superficielles que la nuit) semble ne pas participer aux rations alimentaires des thons et que ceux-ci se nourrissent essentiellement aux dépens des organismes qui restent dans les 200 premiers metres pendant le jour (Roger et Granperrin, 1976). Ce problème peut-il être transposé dans le golfe de Guinee ? Bien que les conditions hydrologiques soient nettement differentes dans les deux océans, surtout au niveau de la profondeur de la couche homogène, Roger (com. pers) pense que le schéma du Pacifique est applicable a l'ocean Atlantique.

En résumé :

- nous savons que les masses d'eaux épipélagiques tropicales dans des conditions de stabilité comme la Structure Tropicale Typique sont relativement pauvres (Le Borgne, 1977);
- nous connaissons les besoins en nourriture des principales espèces de thons pour differents niveaux d'activité;
- la faune migrante semble ne pas participer aux rations alimentaires des thons.

On aboutit alors au paradoxe suivant : comment des bancs de thons peuvent-ils vivre au sein d'un environnement aussi pauvre (Kitchell *et al.* 1978) ? Ces auteurs s'appuyant sur les travaux de Reid (1962) dans le Pacifique central, evaluent a 2.5 ppb la quantite d'organismes proies dans la mer. Malgre cette nourriture theoriquement très diluee, les thons peuvent survivre; ce qui temoigne, premierement, de la forte répartition en tache des proies et, deuxiemement, de la remarquable capacite des thons a localiser et a « moissonner » ces agregats d'organismes proies.

Pour trouver les zones de concentration de thons, il nous faudrait donc rechercher les regions a forte densite de nourriture; la recherche de ces regions nous conduit a trouver dans l'ocean les masses d'eaux a forte productivite et a les suivre dans l'espace et dans le temps. Nous avons vu plus haut que dans les eaux tropicales, le systeme qui joue un rôle primordial dans l'enrichissement de la couche epipelagique est celui de la remontee de la thermocline en surface (ou du moins dans la couche euphotique).

Ceci nous amene a un nouveau concept en ecologie des thons; celui du passe hydrobiologique d'une masse d'eau. Cette notion va nous permettre d'aborder le problème de la localisation de la nourriture des thons. Cette question difficile a resoudre directement, peut cependant être approchée par l'analyse spatio-temporelle de la signature thermique en surface des mecanismes de fertilisation des masses d'eau (Stretta et Slepoukha, 1983). Ce processus peut être detecte par satellite en mesurant une diminution de la temperature de surface. Une des limites dans l'emploi d'un satellite pour rechercher des zones d'enrichissement est l'impossibilite de detecter une structure hydrologique en forme de crête ou de dôme thermiques a partir de l'espace. Comme nous l'avons vu plus haut, dans ces deux situations, la thermocline n'atteint pas la surface. A l'avenir, il serait sans doute possible de detecter ce genre de structure par l'analyse de la couleur de l'eau a partir de satellites equipes d'un radiometre analysant dans le visible le spectre retro-diffuse par la mer (la couleur de l'eau etant le reflet de la quantite de phytoplancton present dans les couches superficielles de l'ocean).

5. CONCLUSIONS

Dans la recente synthèse sur les thonides du golfe de Guinee, Stretta (1987) precise que « la disponibilite dans l'espace et dans le temps des thons, est soumise à de fortes variations et ce n'est que si certaines conditions d'environnement sont réunies que les thons pour-

rons se rassembler. En d'autres termes, le comportement des thonides dans un ecosysteme donné, dépend directement des parametres physiques et biologiques et de leurs interactions c'est-a-dire de leur action synergique ».

Le thon est l'avant dernier maillon de la chaine alimentaire, l'homme etant le dernier et son activite d'exploitation devra être pensee non comme un prelèvement « de l'exterieur » mais comme une insertion dans l'écosysteme. Schematiquement, cette chaine part d'une production primaire importante declenchee par l'arrivee des sels nutritifs dans la couche euphotique pour aboutir au necton et micronecton qui sera la nourriture preferentielle des thons.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anonyme (1986). ICCAT, Bull. Stat. Vol. 16. 140 pp.

Bard F.X. (1983). La peche thoniere française. La Nouvelle Revue Maritime. N°396 : 78-95

Bages et A. Fonteneau (1979). Prises de la flottille thoniere franco-ivoiro-senegalaise et temperature de surface en 1977. Int. Comm. Conserv. Atlantic Tunas (SCRS 1979) Sci. Pap. 7 (1) : 180-198.

Bane G. W. Jr. (1963). The biology of the yellowfin tuna, *Thunnus albacares* (Bonnaterre) in the gulf of Guinea. Thesis, Cornell University 444 p.

Barkley R.A., W.H. Neill and R.M. Gooding (1978). Skipjack tuna, *Katsuwonus pelanis*, habitat based on temperature and oxygen requirements. Fish. Bull., U.S. vol 76 : 653-662.

Blackburn M. (1965). Oceanography and the ecology of tunas. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 3 : 299, 322.

Blackburn M. (1969). Conditions related to upwelling which determine distribution of tropical tunas off western Baja California. Fish. Bull. Vol 68 (1) : 147-176.

Brandhorst W. (1958). Thermocline topography, zooplankton, standing crop, and mechanisms of fertilization in the eastern tropical Pacific. J. Conseil Perm. Explor. Mer, Vol 24 (1) : 16-31.

Cayre P., A. Fonteneau et T. Diouf (1987). Statistiques de la pecherie thoniere FISM durant la periode 1969 a 1985. Rec. Doc. Scient. ICCAT Vol. 26(1) : 237-242

Dragovich A. (1970). The food of skipjack and yellowfin tunas in the Atlantic Ocean. Fish. Bull., U.S. Vol 68 (3) : 445, 460.

Fonteneau A. et T. Diouf (1986). Les pêcheries thonieres de l'Atlantique tropical est. Doc. ICCAT SCRS 86/59 : 99 pp.

Fonteneau A. et T. Diouf (1987). Etat du stock d'albacore de l'Atlantique est au 30 septembre 1987. Doc. ICCAT SCRS 87/75.

Garcia Mamolar J.M. y A.M. Fernandez Gonzalez (1987). Estadisticas de la pesqueria atunera tropical en el Atlantico este 1979-1984. Rec. Doc. Scient. ICCAT Vol. 26 (1) : 192-197.

Herbland A., R. Le Borgne, A. Le Bouteiller et B. Voituriez (1983). Structure hydrologique et production primaire dans l'Atlantique tropical oriental. Oceanogr. trop. vol 18 (2) : 249-293.

Kitchell J.F., W.H. Neill, A.E. Dizon and J.J. Magnuson (1978). Bionergetic spectra of skipjack and yellowfin tunas. *In*, The Physiological Ecology of Tunas. SHARP and DIZON Edit. Academic Press, New-York : 357, 368.

Le Borgne R. (1977). Etude de la production pelagique de la zone equatoriale de l'Atlantique a 4°W. II. Biomasse et peuplements du zooplancton. Cah. ORSTOM., ser. Oceanogr. Vol. XV (4) : 333-349.

Le Borgne R., A. Herbland, A. Le Bouteiller et C. Roger (1983). Biomasse, excretion et production du zooplancton-micronecton hauturier du golfe de Guinee. Relations avec le phytoplancton et les particules. Oceanogr. trop. vol 18 (2) : 419-460.

Le Guen J.C., F. Poinsard et J.P. Troadec (1965). La pêche de l'albacore (*Neothunnus albacares*, Bonnaterre) dans la zone orientale de l'Atlantique intertropical. Etude preliminaire. Doc. Scient. Centre ORSTOM. Poine-Noire. S.R. n°263 : 27 pp.

Margalef F. (1978). What is an upwelling ecosystem. *In* Unwelling ecosystems : 12-14. Boje and Tomczack (Editors). Springer-Verlag. New-York : 303 pp.

Mendelssohn R. and C. Roy (1986). Environmental influences of the FISM. tuna catches in the gulf of Guinea. pp : 170-188. In Proceedings of the ICCAT Conference on the International Skipjack Program. (P.E.K Symons, P.M. Miyake and G.T. Sakagawa Editors) ICCAT : 388 pp.

Pianet R. (1981). Les stocks pélagiques hauturiers : les thonides. pp. : 279-312. *In* Milieu marin et ressources halieutiques de la Republique populaire du Congo. Editeur scientifique : A. Fontana. Travaux et Documents de l'ORSTOM N°138. Editions de l'ORSTOM (Paris) 1981: 352 p.

Postel E. (1955). Recherches sur l'ecologie du thon a nageoires jaunes, *Neothunnus albacora* (Lowe), dans l'Atlantique tropico-oriental. Bull. Inst. Franç. Afr. Noire, Sér. A, 17 : 279, 318.

Postel E. (1955a). Contribution a l'etude de la biologie de quelques *Scombridae* de l'Atlantique tropico-oriental. Ann. Station Oceanogr. Salammbo n°10 : 167 pp.

Postel E. (1969). Repartition et abondance des thons dans l'Atlantique tropical. 109-138. *In* Actes du symposium sur l'oceanographie et les ressources halieutiques de l'Atlantique tropical, Abidjan 20-28 octobre 1966. Organise conjointement par l'Unesco, la FAO et l'OUA. Editions de l'Unesco (Paris).

Reid J. L. Jr. (1962). On circulation, phosphate-phosphorus content and zooplankton volumes in the upper part of the Pacific ocean. Limnol. Oceanogr. 7 : 287, 306.

Roger C. et R. Grandperrin (1976). Pelagic food webs in the tropical Pacific. Limnol. Oceanogr., 21 (5) : 731-735.

Sharp G.D. (1978). Behavorial and physiological properties of tunas and their effects on vulnerability to fishing gear. p.397-450 *In* The physiological ecology of tunas. Sharp and Dizon Editors. Academic Press. New-York.

Stequert B. et F. Marsac (1983). Peche thoniere a la senne. Experience dans l'ocean Indien. Initiations et Documents techniques N°59 : 30 pp. Editions ORSTOM.

Stretta J.M. et M. Slepoukha (1983). Les satellites, l'ordinateur et l'aide a la pêche. La Peche Maritime janvier 1983 N° 1258 : 38-41.

Stretta J.M. et M. Slepoukha (1986). Analyse des facteurs biotiques et abiotiques associes aux bancs de liastaos. pp. 161-169. *In* Proceedings of the ICCAT Conference on the International Skipjack Programm (P.E.K Symons, P.M. Miyake and G.T. Sakagawa Editors) ICCAT : 388 pp.

Stretta J.M. (1987). Environnement et pêche thoniere en Atlantique tropical oriental. pp : 269-308. *In* Chapitre 7 de la Synthese Thon-Atlantique (Fonteneau et Marcille Editeurs), Edition FAO/ORSTOM.

Stretta et Petit (sous presse). Environnement des thonides au large de la Côte d'Ivoire. Synthese maritime Côte d'Ivoire (Editions ORSTOM).

Sund. P.N., M. Blackburn and F. Williams (1981). Tunas and their environment in the Pacific Ocean : a review. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 19 : 443, 512.

2.2 Espèces et pêcheries de thonidés des eaux tropicales de l'Océan Indien Occidental

par
Francis MARSAC
Antenne ORSTOM
Mahé-Victoria-Seychelles

INTRODUCTION

Les ressources thonieres de l'Ocean Indien font l'objet de divers types d'exploitation : d'une part, les pecheries artisanales, interessant des zones relativement cotieres, et d'autre part, les pecheries industrielles etendant leurs activites sur l'ensemble de l'ocean.

La pêche artisanale axee sur le thon est particulierement developpee aux Maldives (50 000 tonnes en 1986), a Sri Lanka (28 000 tonnes en 1986), en Inde (20 000 t/an) et en Indonesie (40 000 t/an). Les methodes utilisees sont assez diverses : canne avec appat vivant, traine, filet maillant, palangre et petite senne. Cette peche vise principalement les jeunes albacores, les listaos et les thonides mineurs.

La peche industrielle met en œuvre deux techniques : la palangre, qui exploite la tranche d'eau comprise entre 80 et 260 m de profondeur (selon le type de palangre utilise) et la senne, qualifiee d'engin de surface mais dont la profondeur d'action peut atteindre 120 m. Les especes cibles sont plus diversifiees que dans le cas de la peche artisanale. On y trouve en effet les especes tropicales comme l'albacore, le listao, le patudo mais egalement les especes d'habitat tempere, colonisant aussi les eaux tropicales sub-superficielles, telles que le germon et le thon rouge *(Thunnus maccoyii)*.

Dans ce paragraphe consacre a la region occidentale de l'Ocean Indien, nous nous limiterons a un rapide etat de l'exploitation de 4 especes (albacore, listao, patudo, germon) par les techniques artisanales et industrielles (palangre et senne), puis decrirons le contexte hydroclimatique de ces pêcheries.

1. APERCU DES PECHERIES

1.1. Albacore

L'albacore est rencontre dans l'ensemble de l'Ocean Indien, jusqu'a 40° S. Neanmoins, la zone d'abondance maximale, telle que peut le suggerer l'analyse des prises, est centree sur l'Equateur, de 10°N a 15° S. Dans l'Ocean Indien occidental, les Maldives et Sri Lanka assurent l'essentiel de la production thonière artisanale. Aux Maldives, les prises d'albacore s'élevaient a 5 300 t en 1986 (IPTP, 1987), soit environ 10 % des prises totales de ce pays. Cette pêche pratiquee en majeure partie a la canne avec appât vivant s'exerce sur de jeunes individus (30 a 50 cm) d'age inferieur à deux ans, n'ayant pas encore atteint leur premiere maturite sexuelle (ANDERSON, 1985). A Sri Lanka, le montant des captures d'albacore etait de 8 000 t en 1986 (IPTP, 1987).

Les pêches palangrieres d'albacore sont stabilisees autour de 30 000 t/an depuis le debut des annees 1970 (IPTP, 1987). Parmi les pays pêcheurs asiatiques, la Coree assure plus de 60 % de cette production palangriere. Les individus pêches sont âges de 3 ans et plus : l'effort de peche vise donc la fraction adulte du stock. Dans le bassin occidental de l'ocean, l'hypothese d'un stock unique a ete avancee (Morita and Koto, 1971; Huang *et al.*, 1973) et est encore retenue a l'heure actuelle.

La peche a la senne developpee recemment dans l'Ocean Indien, s'exerce surtout sur l'albacore et le listao. Depuis 1984, une moyenne de 55 000 t/an d'albacore est capturee par les flottilles française, espagnole et mauricienne, a l'ouest de 70°E. Les prises d'albacore representent environ 48 % des prises totales effectuees a la senne. L'exploitation couvre l'ensemble de la population, des individus les plus jeunes (groupe 0) surtout captures autours des epaves derivantes et ancrees, aux plus vieux (groupe 5+).

L'albacore est donc une espece cible commune aux pêches artisanales et industrielles. Les prises par âge et par engin (fig. 1) font ressortir, d'une part, la nette distinction existant entre la peche artisanale, qui exploitent les jeunes individus evoluant a proximite de la surface et la pêche palangriere qui s'exerce dans un environnement plus profond ou se regroupent les individus ages; d'autre part, la faible selectivite de la senne vis-a-vis de laquelle tous les ages de la population peuvent être vulnerables. La production maximale equilibree de l'albacore dans l'Ocean Indien pourrait etre de l'ordre de 130 à 150 000 t, sous l'hypothese non confirmee d'un niveau de recrutement eleve (100.10^6 recrues/an, Marsac et Hallier, 1986). Les prises annuelles de 100 000 t actuellement enregistrees sont dans l'ordre de grandeur de la production equilibree, d'ou la nécessite de proceder a un suivi minutieux de l'etat du stock d'albacore au fil des annees.

1.2. Listao

Le listao est largement distribue dans l'Ocean Indien. Espece tres opportuniste, elle est capable de grandes migrations pouvant aussi subir d'importances fluctuations interannuelles.

2.2 Espèces et pêcheries de thonidés des eaux tropicales de l'Océan Indien Occidental

par
Francis MARSAC
Antenne ORSTOM
Mahé-Victoria-Seychelles

INTRODUCTION

Les ressources thonieres de l'Ocean Indien font l'objet de divers types d'exploitation : d'une part, les pêcheries artisanales, interessant des zones relativement côtieres, et d'autre part, les pêcheries industrielles etendant leurs activites sur l'ensemble de l'ocean.

La peche artisanale axee sur le thon est particulierement developpee aux Maldives (50 000 tonnes en 1986), a Sri Lanka (28 000 tonnes en 1986), en Inde (20 000 t/an) et en Indonesie (40 000 t/an). Les methodes utilisees sont assez diverses : canne avec appât vivant, traine, filet maillant, palangre et petite senne. Cette pêche vise principalement les jeunes albacores, les listaos et les thonides mineurs.

La pêche industrielle met en œuvre deux techniques : la palangre, qui exploite la tranche d'eau comprise entre 80 et 260 m de profondeur (selon le type de palangre utilise) et la senne, qualifiee d'engin de surface mais dont la profondeur d'action peut atteindre 120 m. Les especes cibles sont plus diversifiees que dans le cas de la pêche artisanale. On y trouve en effet les especes tropicales comme l'albacore, le listao, le patudo mais egalement les especes d'habitat tempere, colonisant aussi les eaux tropicales sub-superficielles, telles que le germon et le thon rouge *(Thunnus maccoyii)*.

Dans ce paragraphe consacre a la region occidentale de l'Ocean Indien, nous nous limiterons a un rapide etat de l'exploitation de 4 especes (albacore, listao, patudo, germon) par les techniques artisanales et industrielles (palangre et senne), puis decrirons le contexte hydroclimatique de ces pecheries.

1. APERCU DES PECHERIES

1.1. Albacore

L'albacore est rencontre dans l'ensemble de l'Ocean Indien, jusqu'a 40° S. Neanmoins, la zone d'abondance maximale, telle que peut le suggerer l'analyse des prises, est centrée sur l'Equateur, de 10°N à 15° S. Dans l'Ocean Indien occidental, les Maldives et Sri Lanka assurent l'essentiel de la production thonière artisanale. Aux Maldives, les prises d'albacore s'élevaient a 5 300 t en 1986 (IPTP, 1987), soit environ 10 % des prises totales de ce pays. Cette pêche pratiquée en majeure partie a la canne avec appât vivant s'exerce sur de jeunes individus (30 a 50 cm) d'âge inférieur à deux ans, n'ayant pas encore atteint leur première maturité sexuelle (ANDERSON, 1985). A Sri Lanka, le montant des captures d'albacore etait de 8 000 t en 1986 (IPTP, 1987).

Les pêches palangrieres d'albacore sont stabilisees autour de 30 000 t/an depuis le debut des annees 1970 (IPTP, 1987). Parmi les pays pêcheurs asiatiques, la Corée assure plus de 60 % de cette production palangriere. Les individus pêches sont âges de 3 ans et plus : l'effort de peche vise donc la fraction adulte du stock. Dans le bassin occidental de l'océan, l'hypothese d'un stock unique a ete avancee (Morita and Koto, 1971; Huang *et al.*, 1973) et est encore retenue a l'heure actuelle.

La pêche a la senne developpee recemment dans l'Ocean Indien, s'exerce surtout sur l'albacore et le listao. Depuis 1984, une moyenne de 55 000 t/an d'albacore est capturee par les flottilles française, espagnole et mauricienne, a l'ouest de 70°E. Les prises d'albacore representent environ 48 % des prises totales effectuees a la senne. L'exploitation couvre l'ensemble de la population, des individus les plus jeunes (groupe 0) surtout captures autours des epaves derivantes et ancrees, aux plus vieux (groupe 5+).

L'albacore est donc une espece cible commune aux pêches artisanales et industrielles. Les prises par âge et par engin (fig. 1) font ressortir, d'une part, la nette distinction existant entre la pêche artisanale, qui exploitent les jeunes individus evoluant a proximite de la surface et la pêche palangriere qui s'exerce dans un environnement plus profond ou se regroupent les individus âges; d'autre part, la faible selectivite de la senne vis-a-vis de laquelle tous les âges de la population peuvent être vulnerables. La production maximale equilibree de l'albacore dans l'Ocean Indien pourrait être de l'ordre de 130 à 150 000 t, sous l'hypothese non confirmee d'un niveau de recrutement eleve (100.10^6 recrues/an, Marsac et Hallier, 1986). Les prises annuelles de 100 000 t actuellement enregistrees sont dans l'ordre de grandeur de la production équilibree, d'ou la necessité de proceder à un suivi minutieux de l'état du stock d'albacore au fil des annees.

1.2. Listao

Le listao est largement distribue dans l'Océan Indien. Espece tres opportuniste, elle est capable de grandes migrations pouvant aussi subir d'importances fluctuations interannuelles.

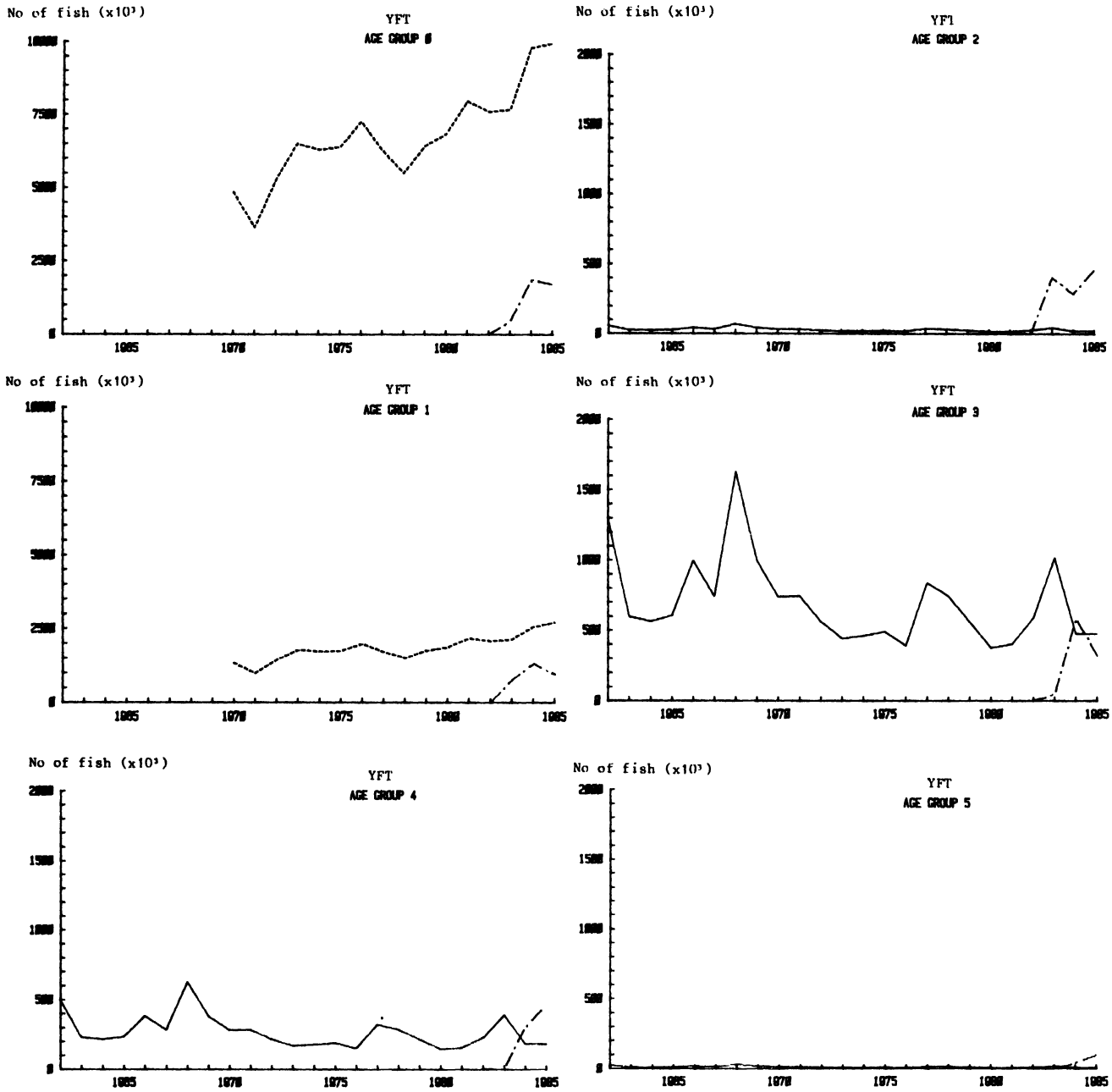


Fig. 1. Prises estimées par âge (en nombre d'individus) pour l'albacore capturé par les pêcheries de surface et palangrière dans l'Océan Indien (pointillé : pêche artisanale; tiret : pêche à la senne; trait plein : pêche à la palangre). D'après Marsac et Hallier (1986)

Le listao est essentiellement capturé par les techniques de surface. Aux Maldives, c'est l'espèce la plus pêchée : 32 000 t en 1984 (Hafiz et Anderson, 1985), 42 000 t en 1985 (Anderson et Hafiz, 1986), 45 000 t en 1986 (IPTP, 1987), soit environ 60 % des prises. La structure de taille des captures est relativement étendue (de 30 à 65 cm). Les plus petites tailles (<40 cm) correspondent à des poissons immatures, généralement pêchés en saison chaude (juin-juillet). Les gros individus seraient présents tout au long de l'année. Des estimations de la production équilibrée de listao autour des Maldives, de l'ordre de 20 000 t, suggéreraient une surexploitation de cette espèce dans les secteurs côtiers (Hafiz, 1985). Néanmoins, une telle analyse effectuée sur une fraction d'un stock peut apparaître contestable et ne reflète en aucune manière la situation réelle du stock, d'autant plus que l'on s'adresse à un grand migrateur. A Sri Lanka, le listao (14 000 t capturées en 1986) représente la moitié de la production totale.

Les prises de listao par les senneurs industriels atteignent actuellement l'ordre de 70 000 t/an : c'est l'espèce prédominante dans les prises. Toute la gamme de taille est couverte. Les plus petits individus (30 cm environ) ayant entré 6 mois et 1 an sont captures autour des épaves. Les individus plus âgés, jusqu'à des tailles supérieures à 70 cm en longueur fourche (âgés de 3 ans et plus) sont capturés à la fois autour des épaves et au sein de bancs généralement plurispécifiques rassemblant listaos, jeunes albacores et jeunes patudos.

Aucune analyse récente de production par recrue n'a été tentée sur l'ensemble du stock de l'Océan Indien.

Les travaux réalisés dans le Pacifique, par la CPS (Commission du Pacifique Sud) et dans l'Atlantique par l'ICCAT (Commision internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique) dans le cadre du programme de l'année internationale du listao, tendent à montrer une bonne résistance des stocks à l'exploitation. Dans l'atlantique, les prises de listao peuvent encore augmenter parallelement a une elévation de l'effort de pêche (ICCAT, 1986). Compte tenu du développement récent de la pêche industrielle de surface de l'Océan Indien, et en reference avec la situation observée dans l'Atlantique, le stock de listao de l'Océan Indien ne serait pas sujet à une surexploitation.

1.3. Patudo

L'aire de distribution du patudo est plus large que celle de l'albacore en raison d'une plus large tolerance physiologique. Cette espece peut en effet séjourner dans les eaux moins riches en oxygene (mer d'Arabie par exemple) et plus froides (eaux profondes, en particulier) que celles habituellement fréquentees par l'albacore.

Aucune prise de patudo n'est reportee dans les statistiques des Maldives ou de Sri Lanka. La distinction entre patudos et albacores au stade juvenile etant tres délicate, il n'est pas impossible que des patudos soient assimilés aux albacores sur les lieux de debarquement.

La pêcherie industrielle de surface exploite une partie du stock de patudo, essentiellement les individus âges de moins de 3 ans (fig. 2), encore immatures. La grande majorite des prises de patudo (70 a 90 %) est faite sous les epaves derivantes. La pêche a la senne a produit de l'ordre de 7 800 t de patudo en 1986.

Le patudo est l'espèce cible des palangriers, dont les captures depassent actuellement le niveau des 40 000 t annuelles. Les individus concernes sont de grande taille, d'âge supérieur à 3 ans. Ils trouvent en profondeur les conditions d'habitat les plus propices.

Les analyses de production par recrue revelent que le stock de patudo ne soulève pas d'inquietude. Du fait de l'exploitation predominante par la palangre, les rendements par recrue restent stables, et une augmentation de cette production pourrait même être attendue si l'on accroissait la mortalite par pêche sur les individus de plus de 2 ans (Marsac et Hallier, 1986).

1.4. Germon

D'habitat préferentiellement tempéré, il est peu rencontré dans les prises de surface des zones tropicales. Les prises de germon par les senneurs ont lieu principalement entre mai et juillet, c'est-a-dire au début de la mousson de sud-ouest, entre 5°S et 10°S. Elles presentent une assez grande variabilité interannuelle (850 t en 1984, 760 t en 1985, 240 t en 1986) et concernent des individus généralement matures dont la taille varie de 100 à 130 cm de longueur fourche. Ces prises de germon restent toutefois très marginales pour les senneurs.

Les palangriers exploitent le germon de manière plus intense. Les prises se sont élevées à 15 000 t en 1984, et sont surtout le fait des palangriers formosans. L'exploitation principale couvre les secteurs subtropicaux et tempérés (15°S à 40°S, ouest de 65°E).

Le niveau d'exploitation actuel semble être proche de la production maximale équilibree, estimée entre 15 000 et 22 000 t (Shiohama, 1986). L'état de ce stock est à un niveau stable depuis plusieurs annees et une augmentation de l'effort palangrier risque de ne pas s'accompagner d'un accroissement significatif des prises.

2. ENVIRONNEMENT HYDROCLIMATIQUE DES PECHERIES

Nous passerons en revue quelques parametres oceaniques pouvant influencer la repartition des thons et l'aptitude à les pêcher par les techniques en vigueur dans notre zone d'etude.

2.1. Contexte météorologique

Le vent est un element déterminant dans l'aptitude des unites de pêche ou des engins a exploiter la ressource. La majeure partie de l'Océan Indien tropical (au nord de 10°S et jusqu'a 20°S dans le canal de Mozambique) est soumise au regime de mousson, qui conduit a une inversion de 180° du vent moyen résultant a la surface de la mer. La region oceanique sous l'effet de la mousson s'etend au nord de 10°S sur la majeure partie de l'Ocean Indien; la mousson peut toutefois s'étendre jusqu'à 20°S dans le canal de Mozambique.

On peut ainsi identifier 3 situations climatiques distinctes, la mousson de nord-est, la mousson de sud-ouest et les intermoussons. La mousson de nord-est engendre des vents modérés (4 a 6 nœuds) et dure de decembre a mars. A l'inverse, la mousson de sud-ouest est marquee par des vents forts (15 a 20 nœuds); les alizes de sud-est se prolongent au-delà de l'Equateur en virant au sud-ouest, et atteignent les côtes indiennes apres s'être chargés d'humidite. Cette situation prevaut de juin à septembre. Entre ces deux moussons, les périodes de transition voient se developper un flux d'ouest dominant, au voisinage de l'Equateur; de part et d'autre, le vent est très instable en force et en direction.

2.1.1. Effet sur les pêcheries artisanales

Les pêcheries artisanales apparaissent a priori comme les plus sensibles aux conditions meteorologiques, du fait de la petite taille des embarcations utilisees. Ainsi, certaines variations saisonnières des rendements de pêche tiennent plus de mauvaises conditions d'accès a la ressource que d'une fluctuation d'abondance de la ressource même. Aux Maldives, la partie nord de l'archipel fait l'objet d'une pêche active durant la mousson de nord-est, et des prises faibles y sont constatees en mousson de sud-ouest. Les cartes de vent d'Hastenrath et Lamb (1979) montrent bien, de juin à août (mousson de sud-ouest) une acceleration du vent au nord de 5°N (vitesse moyenne superieure a 12 nœuds) alors que des conditions clementes y règnent d'octobre à avril (mousson de nord-est). Les atolls du sud sont situes pratiquement tout au long de l'année au sein d'une zone privilégiée où les moyennes mensuelles de vent restent en-deçà de 10 nœuds; de bonnes pêches y sont réalisées quelle que soit la mousson.

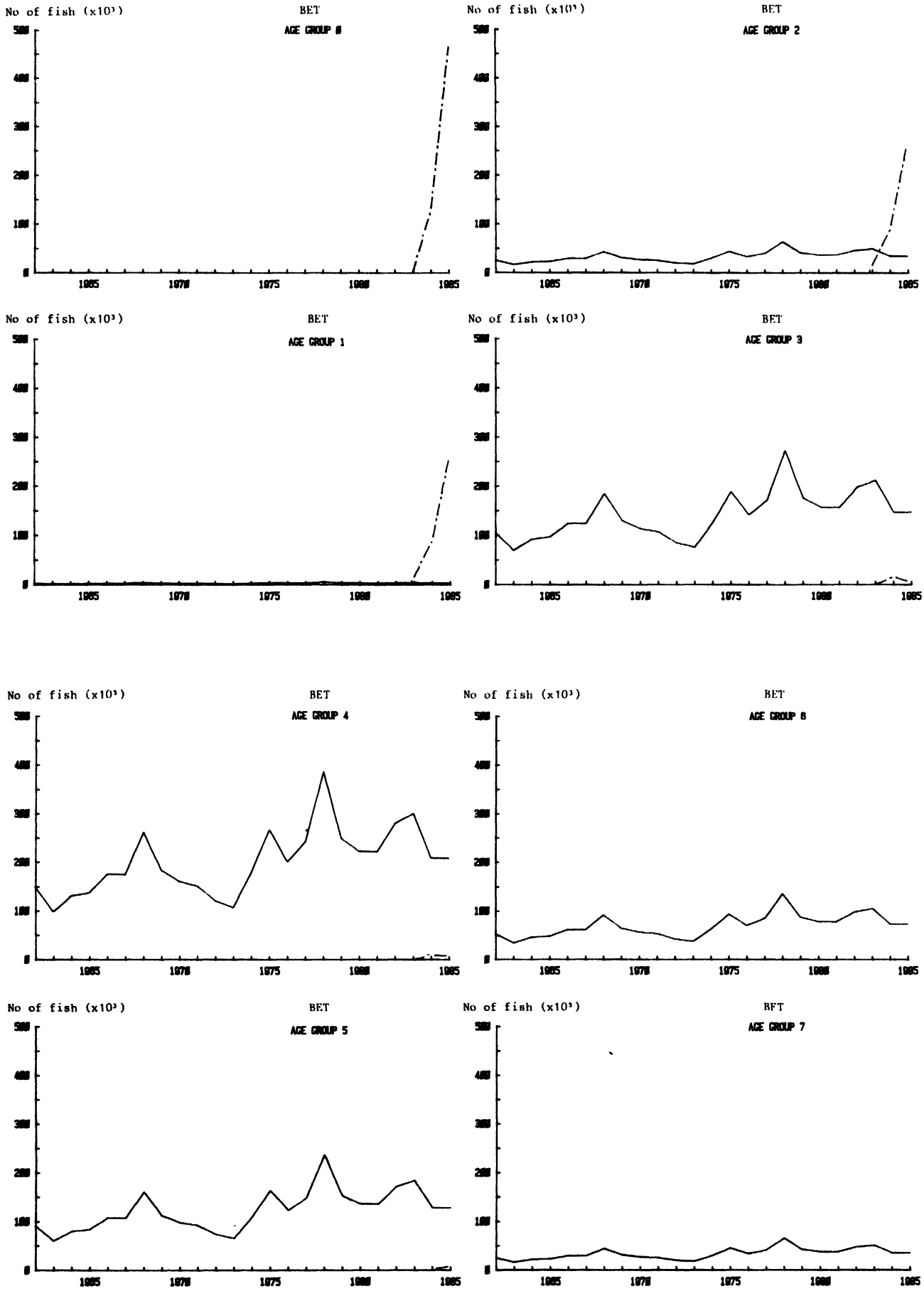


Fig. 2. Prises estimees par age (en nombre d'individus) pour le patudo capture par les pêcheries de surface et palangriere dans l'Ocean Indien. (tiret : pêche à la senne; trait plein : pêche à la palangre). D'apres Marsac et Hallier. 1986.

2.1.2. Effet sur la pêche industrielle à la senne

L'activité des flottilles de senneurs peut egalement être freinee pendant les periodes de vent fort. On peut identifier 3 principaux effets associés au vent : biologique, comportemental, et instrumental, c'est-a-dire lie a la manœuvre de la senne.

Les effets biologiques se traduisent par une dispersion des larves pelagiques, pouvant deriver dans des zones à conditions d'environnement lethales (température trop basse, carence en nourriture planctonique dispersee). Ces phénomenes peuvent avoir pour conséquence une grande variabilite dans le niveau de recrutement de certaines classes d'âge, d'une annee a l'autre. Ceci a déja ete observe sur plusieurs pêcheries de petits pelagiques, en particulier la pêcherie d'anchois au large de la Californie. Bien qu'une correlation significative entre l'augmentation du melange des eaux de surface sous l'effet du vent (« mixing index ») et l'affaiblissement du recrutement en listao ait ete mise en evidence dans le Pacifique (Forsbergh et Miller, 1978), il semble que les especes tropicales de thon restent relativement peu touchees par ce processus, dans la mesure ou aucune prediction valable des prises de thon potentielles a partir des « mixing index » n'a pu être realisee jusqu'alors. La strategie demographique des populations de thons tropicaux qui consiste a pondre de grandes quantites d'œufs sur de vastes zones et a plusieurs periodes de l'annee, aurait pour effet de minimiser l'impact de conditions d'environnement nefastes a petite echelle. Le thon rouge reste plus vulnerable, au moins aux petits stades larvaires, en raison d'une ponte relativement limitee dans l'espace et dans le temps.

Les effets liés au comportement du thon se traduisent par une variabilite dans l'aspect des bancs. Les bancs associes aux epaves derivantes auraient un comportement de groupe accentue en conditions de vent moderées, alors que la dispersion du poisson interviendrait plus facilement par mer tres calme (Marsac, 1986). La conservation du caractere agregatif des epaves derivantes par mer agitee avait deja ete evoquee par Fedoryako (1982), faisant reference aux brassages verticaux a petite echelle spatio-temporelle, induits par le vent, appelés circulation de Langmuir, et generateurs d'enrichissements localises. Les bancs evoluant librement, hors epaves, peuvent revêtir grossierement trois aspects : « balbaya » (breezer, en anglais), lorsque le poisson est concentre en masse juste sous la surface; « sardara » (splasher), lorsque le poisson presente une activite assez vive en surface, se manifestant par des bonds desordonnes, et « brisant » (boiler), état amplifie du sardara, avec bouillonnement intense de la surface de la mer. Lorsque le vent augmente, le balbaya tend a devenir preponderant vis-à-vis des deux autres aspects (fig. 3). Ce type de bancs, dans lequel le poisson est moins mobile que sous les aspects « sardara » ou « brisant », est plus aisement vulnerable a la senne. Cette tendance plutôt favorable est cependant attenuee par le fait que le nombre de bancs perceptibles a l'œil nu diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent : ceci est mis en évidence par le calcul d'un indice d'efficacité de perception qui diminue considérablement à partir d'un vent de 16 nœuds de vent et s'annule a 27 nœuds (fig. 4).

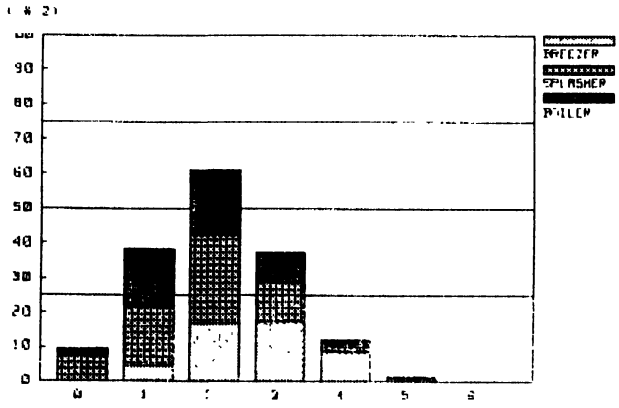


Fig. 3. Distribution des types de bancs en fonction de la force du vent (echelle Beaufort) dans l'Ocean Indien occidental. D'apres Marsac, 1986.

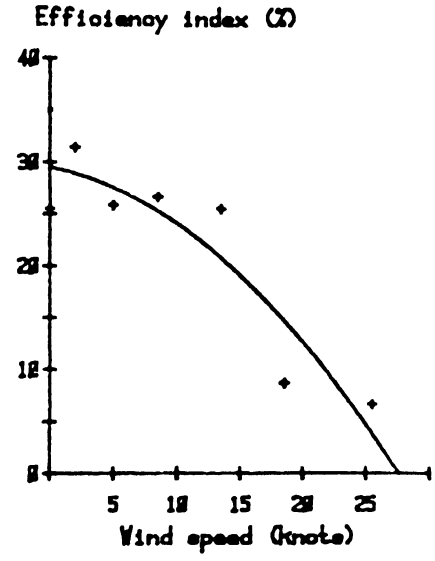


Fig. 4. Evolution de l'indice de perception des bancs de thons (en pourcentage) en fonction de la vitesse du vent (en nœuds) dans l'Ocean Indien occidental. D'apres Marsac, 1986.

Enfin, le systeme de recuperation du filet actuellement utilise au sein des flottilles tropicales ne permet pas de manipulations sans danger dans des conditions de vent depassant 20 nœuds. Des expériences ont ete conduites dans l'Ocean Atlantique à partir d'un thonier equipe d'un « power-block » et systeme associe norvegiens, grâce auquel la recuperation du filet est plus rapide et possible par mauvaises conditions meteorologiques. L'absence de skiff est d'ailleurs un des elements-clefs de ce dispositif (Baynes, 1985). L'influence du vent sur la reussite de la pêche apparait assez nettement sur les fig. 5a et 5b, etablies a partir de 5 annees d'observations sur la flottille française de senneurs en Ocean Indien. Sur les bancs évoluant librement, les rendements maximum apparaissent durant les periodes calmes. Sur épaves, la tendance est assez floue,

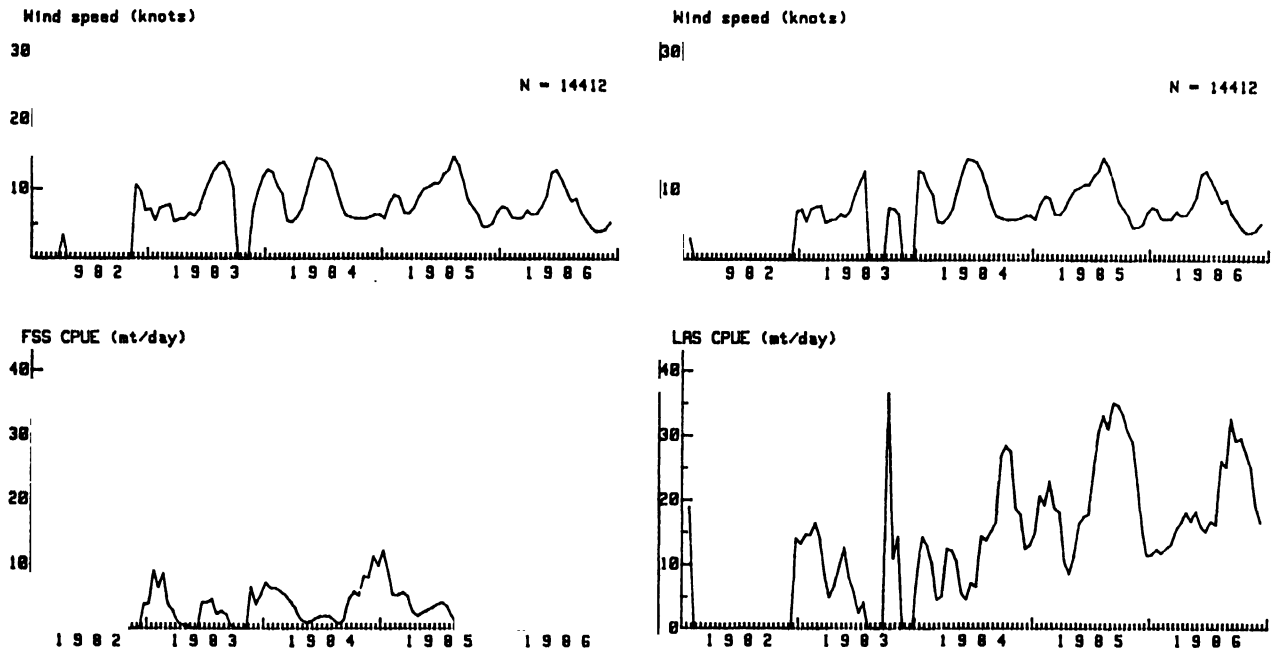


Fig. 5. Vitesse du vent (en nœuds) et prises par unite d'effort (en tonnes/jour), par quinzaine. a) sur mattes libres; b) sur epaves.

Donnees recueillies sur les senneurs français et ivoiriens en activite dans l'Ocean Indien. Les moyennes par quinzaine ont ete lissees pour reduire les variances. D'apres Marsac, 1986.

probablement due à l'effet agregatif qui est conserve par vent fort. Compte tenu de la limite d'utilisation de la senne, les rendements sont minimum au plus fort vent, mais peuvent devenir élevés en dehors de ces conditions limites. Globalement il en résulte une assez bonne relation entre rendements sur mattes libres et force du vent. Ils restent du même ordre de grandeur entre 6 et 13 nœuds et décroissent rapidement au-delà (fig. 6a). En revanche, les résultats sur épaves presentent une forte variabilité vis-a-vis de la forece du vent (fig. 6b).

La peche a la palangre reste moins sensible aux conditions de mer que la pêche à la senne. La palangre offre moins de resistance au courant que le filet. Les palangriers peuvent d'ailleurs travailler dans des régions subtropicales, sujettes à des conditions météorologiques plus dures, et obtenir de bons rendements : c'est le cas de la pêcherie de germon du sud qui opère jusqu'à 40°S.

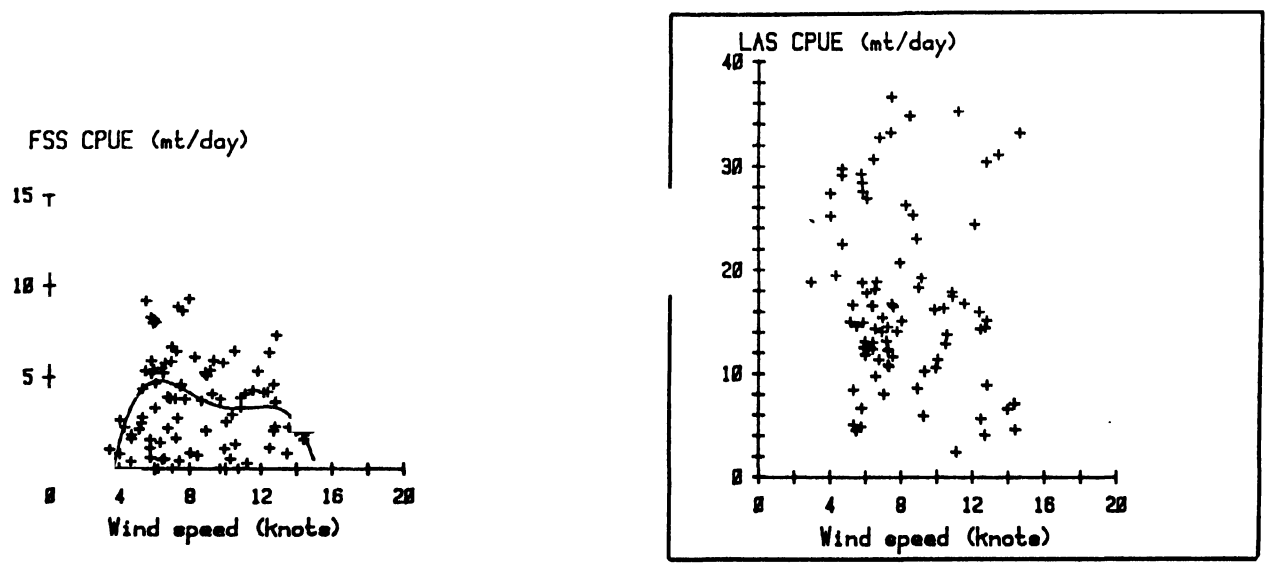


Fig. 6. Diagramme de dispersion des prises par unite d'effort (en tonnes/jour) en fonction de la vitesse du vent (en nœuds). a) sur mattes libres; b) sur épaves. D'apres Marsac, 1986.

2.2 Courants de surface

Le régime des moussons est a l'origine d'une forte variabilite saisonnière des courants de surface (fig. 7).

De decembre a avril, c'est-à-dire pendant la mousson de nord-est, on rencontre 3 courants principaux à composante zonale : le courant nord-equatorial, portant à l'ouest, intéresse surtout l'hemisphère nord mais peut s'étendre jusqu'à 2°S; le courant sud-équatorial portant aussi à l'ouest, au sud de 9°S; et entre ces deux courants, le contre-courant équatorial sud coulant vers l'est, a une vitesse moyenne de 1 à 1,5 nœud (Piton et Magnier, 1975). Durant cette saison, on trouve aussi 2 courants à composante méridienne, le courant côtier est-africain coulant vers le nord et le courant de Somalie, également côtier mais de direction opposée; ces deux courants se rencontrent entre 0° et 5°S et alimentent le contre-courant.

Durant les inter-moussons, se développe au voisinage de l'Equateur un fort courant vers l'est (2 à 3 nœuds) appelé jet equatorial (Wyrtki, 1973) sous l'effet des vents d'ouest.

De juin à septembre, le courant sud-equatorial s'etend vers le nord, le contre-courant disparait, de même que le courant nord-equatorial, sous l'action de la mousson de sud-ouest. Le courant de Somalie creant un upwelling côtier, s'inverse et se scinde en deux tourbillons anticycloniques (Swallow et Fieux, 1982). La région nord-équatoriale du bassin occidental de l'Océan Indien est parcourue par un grand mouvement de dérive vers le nord-est sous l'effet de la mousson de sud-ouest.

Un tel systeme de courants cree des phenomenes de divergence et de convergence d'eaux de surface. Les divergences et upwellings conduisent a un enrichissement de la zone euphotique en sels nutritifs à partir

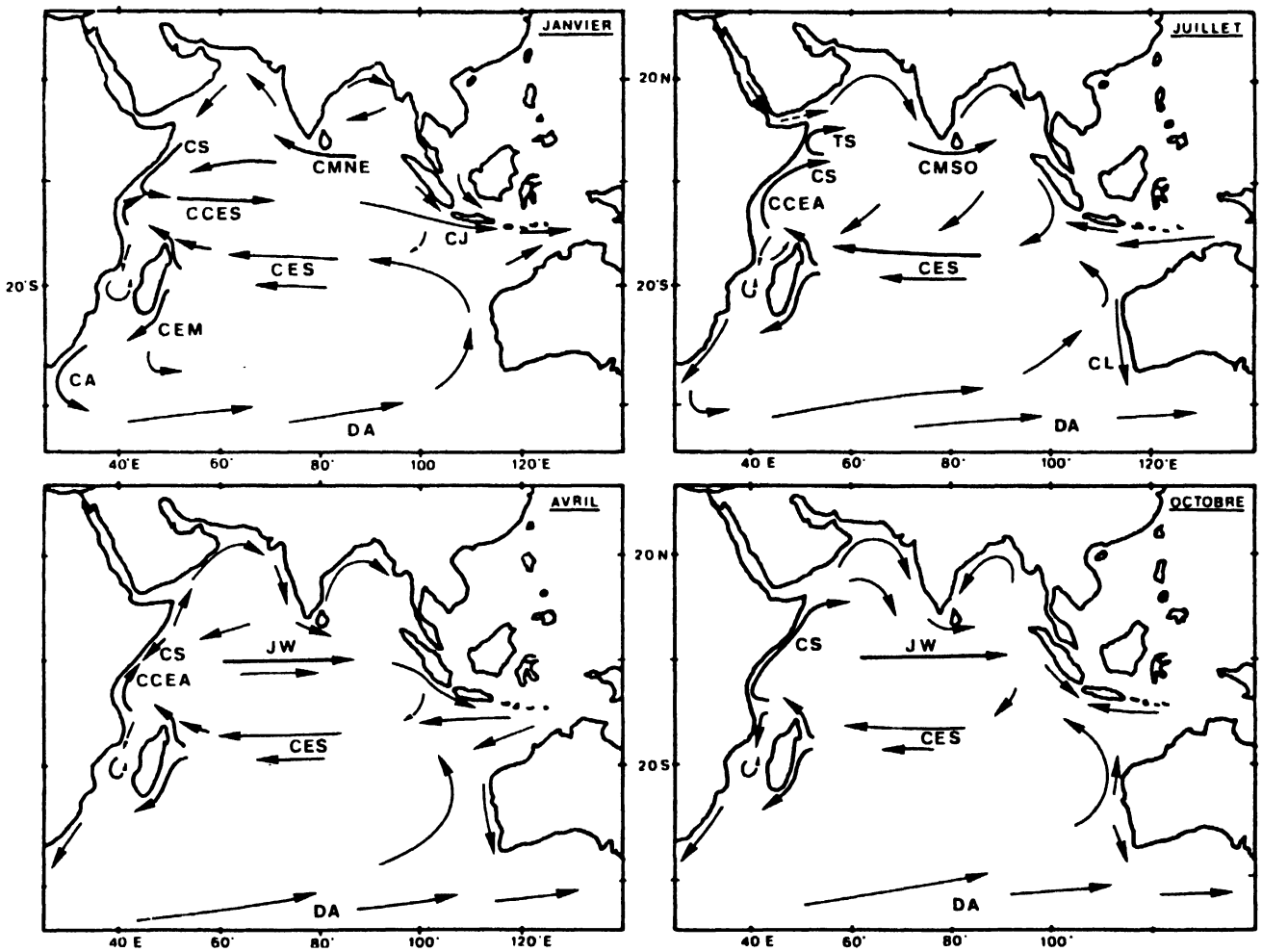


Fig. 7. Courants de surface en janvier, avril, juillet et octobre (d'apres Fieux, comm. pers.)
Legende :

CS : courant de Somalie
TS : tourbillon de Somalie
CMNE : courant de derive de mousson de nord-est
CMSO : courant de derive de mousson de sud-ouest
CCES : contre courant equatorial sud
CCEA : courant cotier est africain
JW : jet equatorial de Wyrtki
CJ : courant de Java
CEM : courant est malgache
CA : courant des Aiguilles
CL : courant de Leuwin
DA : derive Antarctique

desquels peut s'élaborer un réseau trophique conduisant aux predateurs, thons entre autres. Au niveau des divergences, la thermocline se situe à faible profondeur et peut favoriser la concentration de thons à proximité de la surface. Les convergences provoquent une accumulation de proies et de débris à caractère agregatif mais la couche homogène y est plus epaisse (autour de 100 m). Dans l'ouest de l'Ocean Indien, une divergence se produit en mousson de nord-est au sud du contre-courant équatorial sud (entre 6°S à 9°S selon les années). A la même période, une convergence borde le nord de ce contre-courant (entre 0° et 2°S). Dans les deux cas, la thermocline y est tres marquee, avec un gradient de 4°C par 10 m de profondeur (Marsac *et al.*, 1983). Par ailleurs, un upwelling tres localise a ete observé aux accores sud-est du plateau des Seychelles, durant l'intermousson (Piton, 1976). Enfin, l'upwelling de Somalie pourrait être un facteur notoire d'enrichissement de la region nord-equatoriale, où des pêches actives de senneurs sont enregistrees en fin de mousson du sud-ouest.

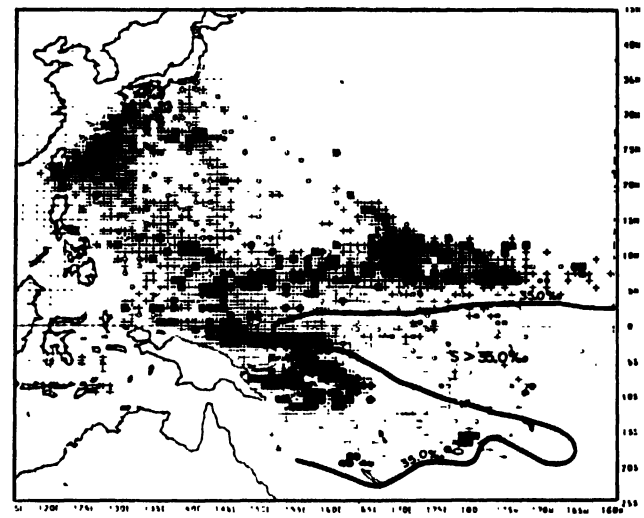


Fig. 8. Distribution des prises de bonites et salinite de surface dans le Pacifique occidental. D'apres DONGUY *et al.*, 1978)

2.3. Température

De novembre a mai, la temperature superficielle de l'ouest de l'océan présente peu de variations. La temperature moyenne s'echelonne entre 27° et 29°C. De juin à septembre, la region situee au sud de l'Equateur subit un leger refroidissement du a la saison. Des pôles plus froids au nord du Cap d'Ambre (Madagascar) et sur la bordure ouest de la partie centrale du canal de Mozambique (15°S-17°S), sous l'effet de l'acceleration du courant et du brassage vertical qui en resulte (Piton et Le Poulain, 1974; Nehring *et al.*, 1984). Au nord de l'Equateur, des fronts thermiques accuses, orientes nord-sud, sont formés à la zone de contact entre les eaux côtieres froides remontees en surface et les eaux chaudes du large (Hastenrath et Lamb, 1979).

En subsurface, les profondeurs maximales de thermocline (entre 150 et 200 m) sont surtout rencontrees au nord de l'Equateur et à l'ouest de 70°E, de mars a octobre. En revanche, devant pratiquement toute l'année, une crête thermoclinale persiste de 5°S à 10°S a l'ouest de 80°E (Wyrtki, 1971). Les pêches industrielles du large se deroulent donc au sein de strutures thermiques verticales assez contrastees, contrairement a ce qui est observe en surface pendant plus de 6 mois de l'année.

2.4. Salinité

La salinité n'agit pas en tant que telle sur la repartition des thons, du moins dans la gamme de valeurs observées dans l'océan. Elle permet de caracteriser les masses d'eau et, de ce fait, peut être utilisable dans la détermination des secteurs de ponte de telle ou telle espèce. Barkley (1969) a par exemple montre que le listao avait tendance à pondre dans des eaux de surface dessalées, surmontant des eaux a maximum de salinite. Par ailleurs, des relations ont été mises en évidence dans le Pacifique ouest (Donguy *et al.*, 1978) entre la position de l'isohaline 35 ‰ et des captures significatives de listao (fig. 8).

Il est a remarquer que les senneurs pechant dans l'est des Seychelles, au sein du contre-courant durant le premier trimestre, trouvent dans leurs prises une grande quantite d'albacores sur le point de pondre. L'examen des cartes de salinite presentees dans l'atlas de Wyrtki (1971) fait apparaitre une advection vers l'ouest d'eau dessalee transportee par le courant sud-equatorial. Or, les pêches des senneurs se localisent sur la bordure nord de cette langue. Des mesures de salinite de surface sont desormais faites en routine a bord des senneurs (depuis juillet 1987) et seront fort interessantes a confronter avec les peches.

Oxygène dissous

2.5. Oxygène dissous

Dans l'ouest de l'Ocean Indien, il existe un contraste tres accuse entre la partie nord, en particulier la mer d'Arabie ou les teneurs en oxygene sont relativement basses en oxygene des 100 m de profondeur et la partie s'etendant au sud de 5°N, ou elles sont beaucoup plus elevees. Ceci tient au caractere ferme de l'ocean dans sa partie boreale, ne favorisant pas la circulation profonde. Les eaux de surface restent partout saturées en oxygene dissous.

Des seuils de tolerance de chaque espece de thon vis-a-vis de la teneur en oxygene ont ete etablis par Sharp et Dizon (1978). A l'appui de ces resultats, il apparait que l'oxygene ne peut pas être un facteur limitant la repartition des thons dans les 100 premiers mètres de l'Ocean Indien occidental, couche d'eau exploitée par les engins de surface. Cependant, au nord de 5°N ou les teneurs sont inferieures à 1 ml/l en dessous de 200 m, cette caracteristique peut devenir determinante sur la disponibilite de l'albacore vis-a-vis de la palangre (l'albacore requiert en effet au minimum 1.5 à 2.5 ml/l d'oxygène dissous). Le patudo, espèce en grande partie visée par cet engin, peut supporter des teneurs faibles en oxygène (jusqu'a 0.5 ml/l) et donc être concentré à plus faible profondeur.

En terme de vulnerabilite aux engins de surface comme la senne, on peut supposer qu'une mince couche d'eau superficielle suffisamment oxygenee surmontant des eaux à teneur reduite, puisse concentrer les thons (principalement albacore et listao) a proximite de la surface, dans un habitat verticalement restreint. Néanmoins, comme le signale a juste titre Cayre (1987), les besoins en oxygene peuvent varier avec la concentration du sang en hematies et donc, avec les facteurs intervenant sur cette concentration, d'ordre physique (temperature, salinité) et biologique (développement sexuel, âge...). Ceci souligne un peu plus la necessite d'intégrer un ensemble de parametres dans les etudes visant a mieux apprehender les processus physico-chimiques intervenant sur la dynamique des bancs (concentration, dispersion) et sur leur vulnerabilité vis-a-vis des engins de pêche.

REFERENCES

ANDERSON, R.C., 1985 - Yellowfin tuna in the Maldives. Collective Volume of Working Documents, IPTP, Colombo, Sri Lanka. TWS/85/16 : 34-50.

ANDERSON, R.C., et A. HAFIZ, 1986 – The tuna fisheries of the Republic of Maldives. Collective volume of Working Documents, IPTP, Colombo, Sri Lanka. TWS/86/21. 323-336.

BARKLEY, R.A., 1969 – Salinity maxima and the shipjack tuna, Katsuwonus pelamis Bull. Jap Soc. Fish. Oceanogr., Prof. Uda's commemorative papers.

BAYNES, R., 1985 - Ebony Lady. Tuna fishing, Norvegian style. Infofish Marketing Digest. (5) : 13-14.

CAYRE, P., 1987 – L'oxygene dissous et la repartition des thons (albacore, listao et patudo) dans l'Ocean Atlantique. La Pêche Maritime (1306) : 92-95.

DONGUY, J.R., W. BOUR, P. GALENON et J.A. GUERFDRAT, 1978 – Les conditions oceanographiques et la peche a la bonite (Katsuwonus pelamis) dans le Pacifique occidental. Cah. ORSTOM (ser. Oceanogr.), 16, (3-4) : 309-317.

FEDORYAKO, B.I., 1982 – Langmuir circulations and a possible mechanism of formation of fish association around a floating object. Oceanology, 22(2) : 228-232.

FORSBERGH, E.D. and F.R. MILLER, 1978 – Skipjack and the wind mixing index. Ann. Rep. IATTC : 5 p.

HAFIZ, A. and R.C. ANDERSON, 1985 – A review of the tuna fisheries of the Republic of Maldives. Collective Volume of Working Documents, IPTP, Colombo, Sri Lanka. TWS/85/49 : 316-323.

HASTENRATH, S. and J. LAMB, 1979 – Climatic atlas of the Indian Ocean. Part 1 : surface climate and atmospheric circulation, Madison, Wisconsin, University of Wisconsin Press : 97 p.

HUANG, C.-C., L. SUN and R.-T. YANG, 1973 – Age, growth and population structure of the Indian yellowfin tuna. J. Fish. Soc. Taiwan 2(1) : 16-30.

ICCAT, 1986 – Compte rendus de la Conference ICCAT sur le programme de l'annee internatonale du listao. ICCAT, Ed. Symons, Miyake and Sakagawa : 388 p.

IPTP, 1987 – Interim report on 1986 catch statistics in the Indian Ocean and Southeast Asian regions. IPTP, Colombo, Sri Lanka : 63 p.

MARSAC, F., B. PITON, M. POTIER et B. STEQUERT, 1983 – Campagne experimentale de pêche a la senne du thonier « Yves-de-Kerguelen » dans l'ouest de l'Ocean Indien tropical. Rapp. Sci. Mission ORSTOM Seychelles (3) : 112 p.

MARSAC, F., 1986 – Sea state and fisheries activites. Papier presente au 12ème cours international UN/FAO « Contribution of Remote Sensing to Marine Fisheries », Rome, Italie, 11 au 30-05-87 : 8 p + fig.

MARSAC, F. et J.P. HALLIER, 1986 – Preliminary yield per recruit analysis of the Indian Ocean yellowfin and bigeye fisheries. Collective volume of Working Documents, IPTP, Colombo, Sri Lanka. TWS 86/37 : 58-72.

MORITA, Y. and T. KOTO, 1971 – Some considerations on the population structure of yellowfin tuna in the Indian Ocean based on the longline fishery data. Bull. Far Seas Fish. Res. Lab. (4) : 125-140.

NEHRING, D., ARLT, G., BUBLITZ, G., GOHS, L., GOSSELCK, F., HAGEN, E., KAISER, W., KIJHNER, E., MICHELCHEN, N., POSTEL, L., SAETRE, R., SCHEMAINDA, R., SIEGEL, H., SILVA, P., and WOLF, G., 1984 – The oceanological conditions in the western part of the Mozambique Channel in february-march 1980. Geod. Geophys. Veröff., Reihe IV, Heft 39 : 163 p.

PITON, B. et POULAIN J.F., 1974 – Compte rendu de la croisiere « Mozambique » du N.O. Vauban (01.1974) du 27 fevrier au 28 mars 1974, doc. Sci. de la Mission ORSTOM de Nosy-Be, Ser. Archives. N° 21 : 8 p, 3 fig.

PITON, B. et Y. MAGNIER, 1975 – Remarques sur la circulation et les caracteristiques hydrologiques de la couche superficielle entre Madagascar et l'Equateur. Cah. ORSTOM (Ser. Oceanogr.) 13(2) : 117-132.

PITON, B. 1976 – Particularites meteorologiques et oceanographiques des parages du banc des Seychelles (Ocean Indien). Cah. ORSTOM (ser. Oceanogr.), 14(4) : 289-299.

SHARP, G.D. et A.F. DIZON, 1978 – Ed. of « The physiological ecology of tunas ». Academic Press.

SHIOHAMA, T., 1986 – Overall fishing intensity of lenght composition on albacore caught by longline fishery in the Indian Ocean 1952-1984. Collective volume of Working Documents, IPTP, Colombo, Sri Lanka. TWS/86/24 : 73-83.

SWALLOW, J.C. et M. FIEUX, 1962 – Historical evidence for two gyres in the Somali Current. J. Mar. Res., 40. Suppl : 747-755.

WYRTKI, K., 1971 – Oceanographic atlas of the International Indian Ocean Expedition Washington, D.C., National Science Foundation, 531 p.

WYRTKI, K., 1973 – An equatorial jet in the Indian Ocean. Science, Wash, 181 : 262-264.

2.3 Panorama de la pêche thonière dans le Pacifique Sud-Ouest

par

Michel PETIT[1]
Jean-Michel STRETTA[1]
Renaud PIANET[2]

1. Oceanographes du Centre ORSTOM de Montpellier
BP 5045 34032 Montpellier Cedex
(France)

2. Oceanographe du Centre ORSTOM de Noumea
BP A5 NOUMEA Cedex
(Nouvelle-Caledonie)

Sommaire :

Introduction

1.– Contexte général : le Pacifique Sud-Ouest, premier gisement thonier mondial.

2.– Prises, engins et efforts de pêche : restructuration technologique et prédominance de la pêche a la senne.

3.– Hydroclimat et pêche thoniere : des courants et des iles.

Conclusion

Le Pacifique tropical sud-ouest (fig. 1) recèle des stocks de thonidés considerables, certainement parmi les plus importants de la planète : pour les deux principales especes, la bonite *(Katsuwonus pelamis)* et le thon jaune *(Thunnus albacares)*, les experts evaluent la ressource a plusieurs millions de tonnes. (KEARNEY, 1983).

Cette evaluation a ete concrétisée au début des années 80 par le spectaculaire et brutal accroissement des prises de thon de surface par les flottilles industrielles japonaises et americaines qui ont alors vu, dans le Pacifique Sud-Ouest, un champ d'investigation privilégié que ce soit pour un essai de restructuration technologique (Japon) ou pour résoudre une situation géopolitique compliquée (USA).

Devant cet accroissement des prises dans le Pacifique Ouest – encore beaucoup plus marqué et plus rapide que celui de l'océan Indien, déjà perçu comme considérable –, les autorités politiques, scientifiques et economiques, d'abord prises de vitesse, ont réagi depuis quatre ans et l'on peut trouver beaucoup de documentations récentes sur le sujet. Citons notamment les publications du Programme pour le Développement des Îles du Pacifique (PIDP), en consultation pour les études thonières avec l'Agence des Pêches du Forum (FFA) et les publications de la CPS dont le programme d'évaluation des thonidés et marlins – auquel l'ORSTOM participe – collecte de 60 % à 90 % des données de prises thonières de la région. Nous tenterons ici une brève synthèse de l'ensemble de ces articles.

La pêche de nombreuses especes de thons est présente dans la tradition et la culture de l'ensemble des îles du Pacifique Sud et plus particulièrement, pour les îles possédant de faibles surfaces cultivables et de petits lagons; ce qui n'est pas surprenant, car alors, le thon, bien que difficile à capturer, se doit de prendre une importance accrue dans la ration alimentaire. Cependant, compte-tenu de la faible densité de population, le total des prises artisanales, toutes espèces confondues, qu'elles soient destinées à l'auto-consommation ou à entrer dans un circuit commercial, ne representent qu'environ 10 000 t par an pour le Pacifique Sud.

Ce chiffre, compare aux quelques 250 000 t de bonites de prises industrielles dans la même region, marginalise complètement ce secteur d'activité dans notre presente étude, à cette remarque près : il est certain que l'interêt traditionnel pour le thon dans ces régions aide beaucoup à la préparation des accords de pêche et favorise l'intégration des pêcheurs artisanaux dans la pêche industrielle moderne.

Avant d'analyser en détail les prises industrielles, nous pouvons rapidement regarder le contexte général où elles ont lieu.

1. CONTEXTE GÉNÉRAL : Le Pacifique Sud-Ouest, premier gisement thonier mondial

1.1. La pêche à la senne : les précurseurs japonais et américains :

Nous nous intéressons ici surtout à l'évolution de la pêche à la senne qui constitue aujourd'hui le meilleur moyen de production tant en yen qu'en dollars... le lecteur trouvera plus de détails dans des articles d'économie politique (DOUMENGE, 1987; FELANDO, 1987). Les Japonais sont les premiers à avoir commence l'exploitation thonière industrielle du Pacifique Sud-Ouest (1948). Dès 1952, on comptait par exemple, seize senneurs appartenant à treize armements. Les résultats obtenus, plutôt mauvais, ont mis en sommeil cette technique de pêche laissant la place à la longue ligne puis à la canne. Il a fallu attendre la fin des années 60 (1965-1973) avant que la senne ne commence à

devenir une technique maitrisée dans cette région. Ce sont surtout les bateaux de KITAMAKI (association des senneurs du Nord Pacifique) qui ont contribué à faire passer les captures de 1 800 t (avec 6 bateaux) en 1973 à 24 000 t (avec 13 unités) en 1977. Dès cette époque, le gouvernement japonais a pris des mesures incitatrices à la restructuration et a la modernisation du moyen de production (licences supplémentaires pour les senneurs, primes pour la suppression de canneurs, senneurs de recherche...), tout en etant vigilant a ne pas casser le marche par un débarquement excessif (limitation du nombre et de la taille des bateaux...) et ce, malgré la lutte d'influence entre le groupement des senneurs (KITAMAKI) et le groupement des canneurs et palangriers (NIKKATSUREN).

Parallèlement, les bateaux senneurs qui operaient dans le Pacifique Est (zone CYRA) ont eu à affronter, vers la fin des années 70, les conséquences de la mise en place des zones économiques nationales et les problemes géopolitiques qui y etaient étroitement liés. Les premières campagnes américaines ont débuté en 1974 par des expérimentations U.S. en Nouvelle-Zelande, pendant l'ete austral. A partir de 1980, quelques unités commencent a travailler sur l'équateur du Pacifique Ouest. Pendant les quatre annees qui suivent, on assiste alors à un développement fulgurant de cette pêcherie puisque, de 80 a 83, le nombre de senneurs a quasiment quintuplé et les prises ont presque double chaque annee (tableau n°1).

Tableau n°1.— Essor de la pêche à la senne, dans le Pacifique Ouest vers la fin des annees 70 et le debut des annees 80 : estimation des prises (T en milliers de tonnes) et du nombre de senneurs (N.S.). (D'apres PETIT, 1984).

Années		1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Pêcherie japonaise	N.S.	10	13	16	16	14	24	33	33
	T	13,8	23,8	28,8	37,1	40,0	54,2	93,4	130
Pêcherie d'origine Est Pacifique	N.S.	3	6	6	7	14	19	25	65
	T	5,2	10	10,5	11	14	28	75	150

Cet essor de la pêche industrielle à la senne, americaine et japonaise, a transformé le Pacifique Ouest en un pôle d'attraction pour les professionnels de divers pays, riverains ou non, qui ont essaye d'y participer : la Nouvelle-Zélande avec quatre ou cinq petits senneurs a temps partiel, les Îles Salomon en affretant un « group seiner » japonais, les Philippines en déplaçant, de la mer des Célèbres et de Sulu dans le Pacifique Ouest deux senneurs en 1984, l'Indonésie en créant la societe franco-indonésienne Multi Transpêche Indonesie (actuellement 3 senneurs et quatre canneurs), la Corée du Sud, Taïwan, Palau, la Papouasie Nouvelle-Guinee, Nauru et l'URSS.

Ce développement des pêcheries dans cette région du monde, aussi rapide soit-il, n'est pas exempt de contraintes. Celles-ci ont ete brièvement resumées par PETIT (1984) :

« Les contraintes techniques »

Si les espèces et leur biologie sont les mêmes qu'en Atlantique, leur comportement et leur environnement diffèrent. Les mattes sont rapides et très mobiles dans des eaux claires a thermocline profonde. La prévision des zones à forte concentration, liée au guidage des flottilles, est et sera d'autant plus prépondérante que la concurrence est forte et que les modifications de l'environnement marin, déterminant les variations de concentration, sont fines (température, salinité, courants, etc).

La ressource présente, les concentrations localisées, reste le problème de la capturabilité. C'est le domaine des professionnels qui savent bien qu'il n'existe pas une technique de pêche à la senne. Diverses solutions ont vu le jour, plus ou moins rapidement, en fonction d'une certaine imagination et d'une certaine expérience : il n'y a pas, en effet, beaucoup de rapports entre la pêche pratiquée :

— par un « group seiner » japonais : il s'agit de trois bateaux travaillant ensemble et bien équipes (sonar couleur a scanner, positionnement sophistique) : un petit senneur de 116 t, un bateau de prospection de 46 t et un ancien canneur congelateur pour le stockage,

— par un senneur philippin travaillant de nuit sur des radeaux fixes,

— par un senneur japonais suivant ses « payaos »,

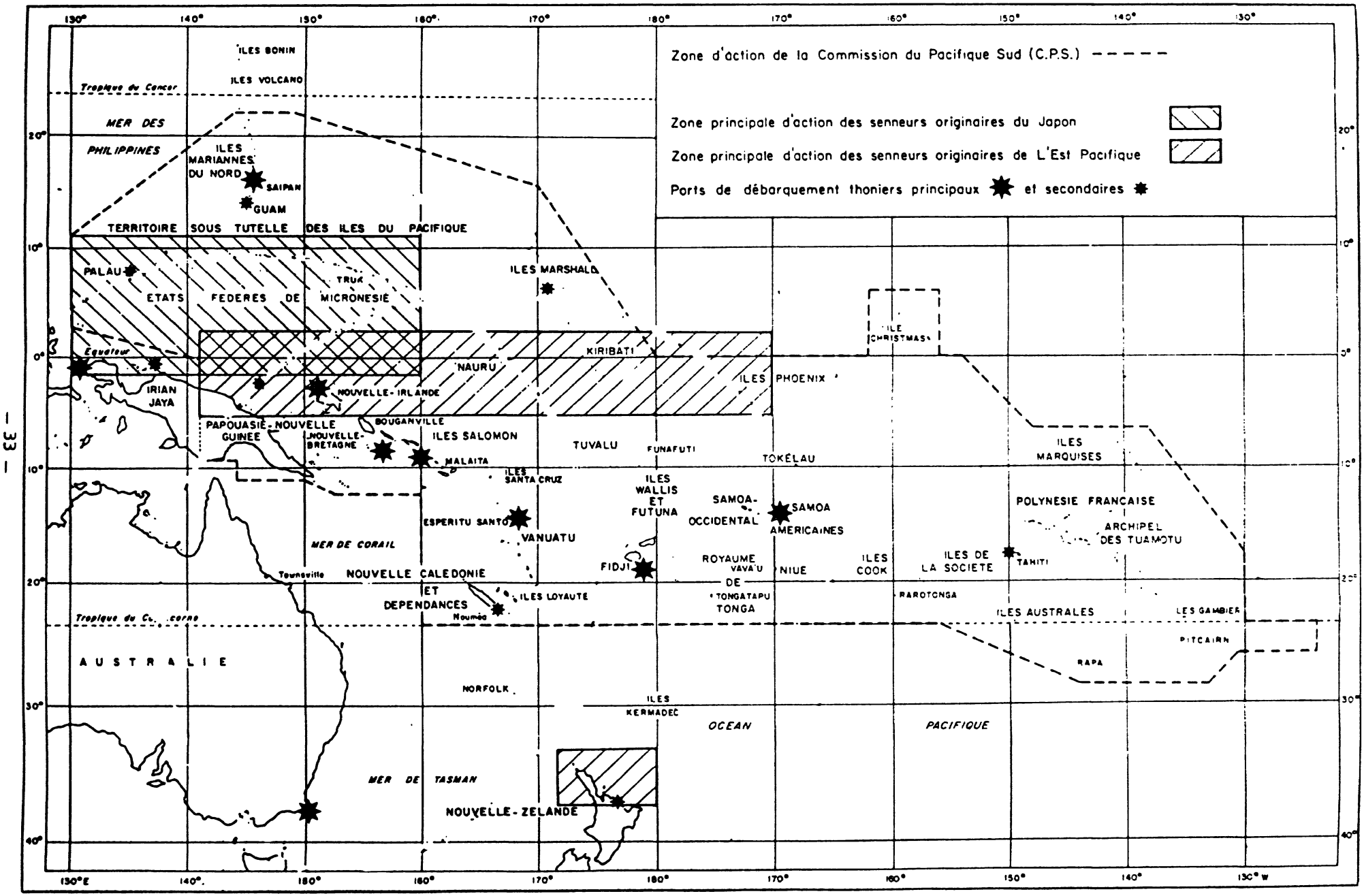
— par un senneur americain operant « a la volee » ou sur des epaves qu'il suit ou « donne » a un collegue grâce a des balises precodées sur detection radar.

Des progres considerables ont notamment ete realises quant a la taille et la forme des filets.

Contraintes économiques

Le thon est un produit de luxe consomme par les pays industrialises : Japon, Europe, Amérique du Nord. Dans ces deux derniers cas, le lieu de production est éloigné du lieu de consommation de quelques dizaines de milliers de kilomètres. Si la mobilite des unités de production (les navires) est reconnue comme un facteur de developpement (certains bateaux U.S. ont opère la même année dans le Pacifique Est, dans l'Atlantique et dans le Pacifique Ouest), il est necessaire que le temps de recherche soit diminué au maximum et que le poisson soit traité sur place et non transporte congele afin de maintenir une marge bénéficiaire raisonnable.

Nous avons déjà vu que pour diminuer le temps de recherche, la principale solution, pour les bateaux compétitifs, était d'améliorer la prévision des zones à



1.— Carte regionale du Pacifique Sud Ouest.

forte concentration de poisson et le guidage des flottilles.

Les lieux de débarquement (fig. 1) du poisson dans le Pacifique Ouest sont nombreux mais inégalement équipés et les principaux (Guam, Pago-Pago, etc.) vont bientôt être renforcés par la mise en œuvre de conserveries modernes (Biak, Bangkok) soutenues par des sociétés telles que Starkist, Van Camp, Saupiquet...

Les contraintes politiques

Dans quelle conjoncture politique s'imbriquent les pays dont les ZEE appartiennent à la pêcherie du Pacifique Ouest?

Cette question, à elle seule, mériterait un article complet. Un examen rapide amène à considérer les trois ensembles Micronésie, Mélanesie et Polynesie comme un « monde insulaire atomisé, aspire par sa peripherie... où l'asymétrie est totale entre l'importance des bordures continentales, des groupes insulaires, des ressources humaines et économiques... » (ROUX, 1983). Et pour ces trois ensembles qui, malgré leurs ZEE immenses, pèsent peu (90 000 km de terre, 2 000 000 d'habitants), l'exploitation de leurs ressources thonières peut s'envisager selon trois possibilités non exclusives : pêcherie locale entièrement contrôlée, entreprises conjointes ou production complètement etrangère. En fait, le choix est beaucoup plus limite, car deux types de problèmes se posent rapidement :

1) Le coût des unités de production, tant a l'achat qu'à l'entretien (un senneur américain classique de 1 100 t vaut à l'achat 11 millions de dollars et son entretien annuel nécessite 3 millions de dollars) n'est pas en rapport raisonnable avec la masse monetaire des pays concernés. Autre exemple : les dépenses énergétiques d'un ou deux senneurs (240 000 dollars/an pour le carburant d'un senneur de 1 100 t) dépassent souvent la facture pétrolière nationale d'un bon nombre de pays!

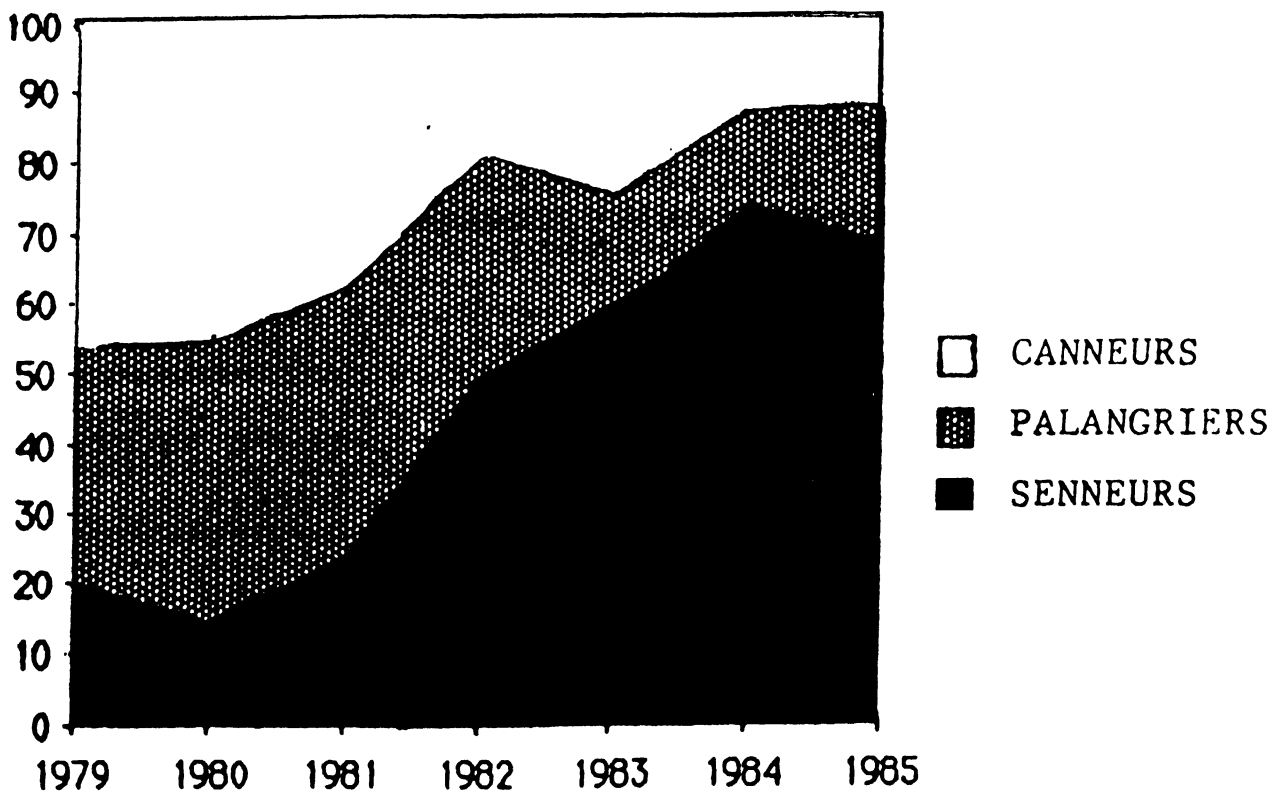
2) En dépit de l'étendue des zones économiques et de l'importance de la ressource, il ne faut pas oublier le caractère migratoire des espèces pêchées et les variations de l'environnement qui conditionnent les concentrations. Il en résulte en un point donné, des fluctuations d'abondance saisonnières ou/et interannuelles qui peuvent être conséquentes, particulièrement au Sud de 1°S. Il n'est donc pas possible d'envisager une pêcherie dans le cadre d'une zone économique prise isolément ».

1.2 Actuellement :

Dans le paragraphe precédent nous avons volontairement insisté sur la pêche à la senne et son histoire récente, tout simplement parce qu'il est incontestable que le développement de cette forme de pêche et l'adaptation de ce type d'engin ont et auront des conséquences sur l'ensemble du Pacifique Ouest, telles que les autres modes de pêches risquent d'en être quelque peu marginalisés (fig. 2).

En résume, avec plus de 20 % des prises annuelles mondiales, les pays insulaires du Pacifique Sud et Ouest sont amenes à jouer un rôle de tout premier plan dans le marche international du thon. Bien que certaines régions semblent subir un très grand effort de pêche, la sous-exploitation de la région ne fait pas de doute et l'avenir se pose en termes d'economie : dans quelle mesure le marché international sera-t-il capable d'absorber l'augmentation de production liee à l'expansion de la pêcherie?

Actuellement, la politique géneralement pratiquee par les pays de cette partie du globe, est une politique



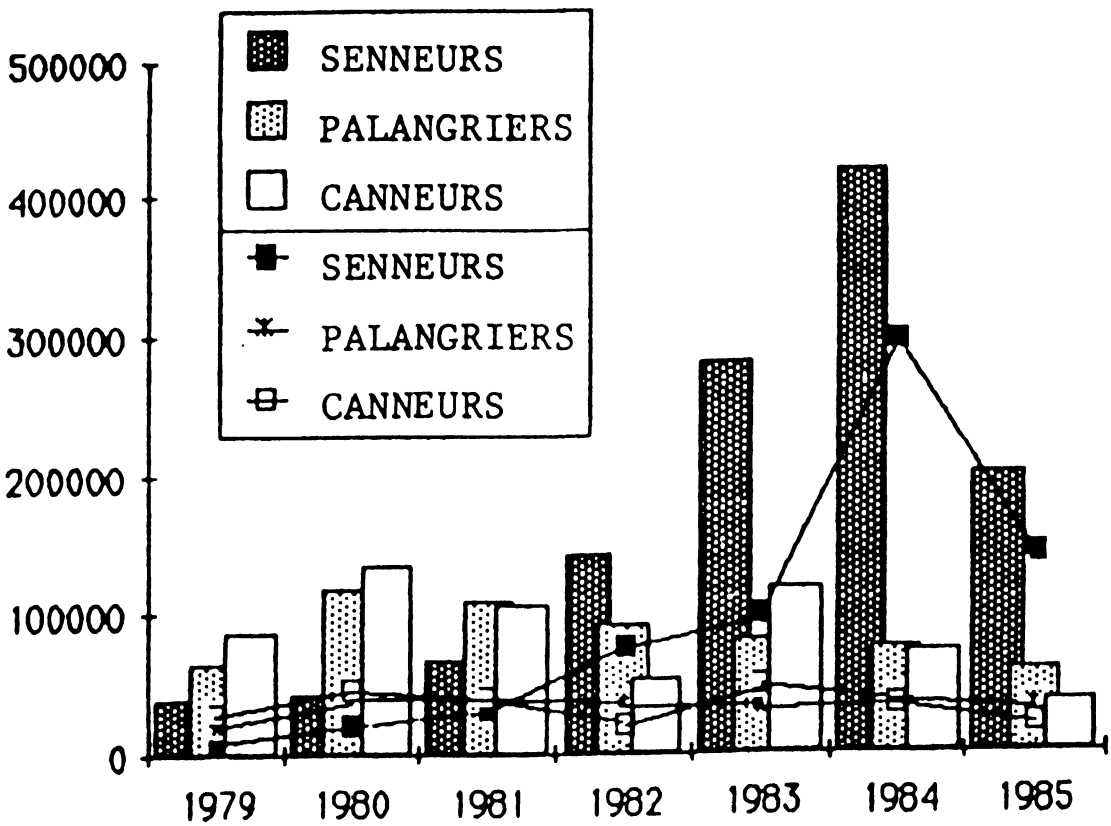
2.– Proportion du volume total des prises par type d'engin de pêche dans le Pacifique Occidental (Source CPS, An. 1986).

Tableau n° 2 : repartition selon les engins de pêches, de l'effort au cours de l'annee et des prises par especes ainsi que de la PPUE par espece. (Source : CPS et divers)

	1984	1985				1986						1987 (5)
	A	T1	T2	T3	T4	A	T1	T2	T3	T4	A	T1
						PECHE A LA SENNE						
Effort (1)	100 %	26 %	24 %	26 %	24 %	100 %	29 %	26 %	23 %	22 %	100 %	NC
BO (3)	74 %-11	71 %-12	76 %-14	79 %-12	72 %-12	74 %-12	78 %-20	80 %-19	65 %-10	70 %-16	74 %-17	50 %-12
TJ (3)	25 %-5	29 %-5	24 %-5	21 %-3	26 %-4	25 %-4	22 %-6	19 %-5	35 %-5	30 %-7	25 %-6	50 %-12
Autres (3)	1 %-1	< 1 %-NC	< 1 %-NC	< 1 %-NC	2 %-1	1 %-1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1
Total (3)	100 %-17	100 %-17	100 %-19	100 %-15	100 %-17	100 %-17	100 %-26	100 %-24	100 %-15	100 %-23	100 %-23	100 %-24
						PECHE A LA CANNE						
Effort (1)	100 %	50 %	24 %	8 %	18 %	100 %	44 %	30 %	13 %	13 %	100 %	NC
BO (3)	95 %-7	95 %-4	92 %-4	97 %-6	97 %-7	95 %-5	97 %-7	98 %-8	99 %-14	97 %-9	98 %-9	99 %-10
TJ (3)	41 %-< 1	5 %-0,5	7 %-0,5	3 %-< 1	3 %-0,5	5 %-< 1	3 %-< 1	2 %-< 1	< 1 %-< 1	3 %-< 1	2 %-< 1	1 %-< 1
Autres (3)	1 %-< 1	< 1 %-NC	1 %-0,5	< 1 %-NC	< 1 %-NC	< 1 %-NC	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1	< 1 %-< 1
Total (3)	100 %-7	100 %-4,5	100 %-5	100 %-6	100 %-7,5	100 %-5	100 %-7,5	100 %-8	100 %-14	100 %-9	100 %-9	100 %-10
						PECHE PALANGRIERE						
Effort (2)	100 %	29 %	25 %	25 %	21 %	100 %	37 %	30 %	22 %	11 %	100 %	NC
TJ (4)	56 %-12	5 %-9	58 %-13	57 %-12	56 %-10	56 %-11	58 %-11	64 %-11	62 %-11	64 %-12	61 %-11	50 %-6
PA (4)	25 %-5	31 %-5	20 %-4	22 %-5	27 %-5	25 %-5	25 %-5	22 %-4	23 %-4	31 %-6	24 %-4,5	37 %-4
GF (4)	12 %-1	6 %-1	16 %-4	16 %-3	11 %-2	13 %-2	10 %-2	7 %-1	10 %-2	2 %-< 1	8 %-1,5	1 %-< 1
Autres (4)	7 %-1	9 %-1,5	6 %-1	5 %-1	6 %-1	6 %-1	7 %-1,5	7 %-1	5 %-1	3 %-< 1	7 %-< 1	13 %-1,5
Total (4)	100 %-19	100 %-16,5	100 %-22	100 %-21	100 %-18	100 %-19	100 %-19,5	100 %-17	100 %-18	100 %-18	100 %-17,5	100 %-12

Legende : Tn = n^ème trimestre
A = totaux annuels
Effort : (1) : % de l'effort annuel en tonnes par j. de peche + recherche, NC = non calculable
(2) : % de l'effort annuel en millions d'hameçons, NC = non calculable
(3) : % des prises en tonnes du trimestre de l'annee suivi de la PPUE
(4) : % des prises en nombre du trimestre de l'annee suivi de la PPUE
(5) : estimation d'apres les premieres statistiques de la CPS
BO Bonite, TJ = Thon jaune, PA = Patudo, GF = Germon

d'ouverture par la signature d'accord type — par exemple, l'accord signé entre seize pays insulaires du Pacifique et les USA, le 2 avril 1987 a Port Moresby — ainsi qu'un souci constant de développer des industries locales de traitement du poisson. Il est intéressant de constater une certaine prudence dans les investissements en depit des prises records effectuees; les intérêts des pays détenteurs de la ressource ne coïncident pas



3.— Prises par type d'engin (exprimees en tonnes metriques) : volume total estime contre volume signale a la CPS. D'apres An. 1986.

forcément, en effet, avec ceux des pays qui l'exploitent, et les changements survenus dans l'industrie thonière depuis le début de la decennie y sont certainement pour beaucoup.

2. PRISES, ENGINS ET EFFORT DE PECHE : restructuration technologique, prédominance de la senne, stabilité des stocks

Pour évaluer de façon réaliste les stocks de poissons, les dynamiciens ont imperativement besoin de statistiques des prises et efforts, relativement completes quant à la repartition spatio-temporelle, s'ils utilisent les methodes classiques. A l'heure actuelle, seule la CPS commence a collecter — non sans difficultes — de telles donnees et ceci seulement depuis deux a trois ans (Anonyme, 1986) comme le montre la figure 3.

Dans l'approche globale qui nous interesse ici, on peut retenir que les prises annuelles dans le Pacifique occidental sont de l'ordre de 450 000 tonnes approximativement réparties ainsi : 60 % de bonites, 25 % de thons jaunes, 8 % de thons obeses *(Thunnus obesus)*, 2 % de germons *(Thunnus alalunga)*, 5 % de divers. Retenons également qu'aujourd'hui 60 a 70 % de ces captures sont assurees par les senneurs et moins de 10 % par les canneurs. Pour la pêche de surface, les prises par jour de pêche + recherche (PPUE) sont respectivement pour les senneurs et les canneurs de 15 a 20 tonnes et de 7 a 9 tonnes.

Le taux moyen de poissons pris par un palangrier avoisine 2 pièces pour 100 hameçons. Quant a l'effort de pêche annuel proprement dit, il faut compter 5 500 jours de pêche + recherche pour les canneurs et 17 000 pour les senneurs, le nombre d'hameçons mouilles par les palangriers se situant autour de 80 millions.

Après l'extraordinaire développement de la pêche à la senne jusqu'en 84, on peut se demander quelles sont les consequences sur le stock des thonides. Le tableau n° 2 qui précise la repartition par engins et especes des prises et des PPUE apporte quelques réponses si nettes qu'il est inutile de faire des tests statistiques :

a) La repartition des especes dans les captures de chaque engin est d'une constance remarquable : les senneurs prennent 75 % de bonites, 25 % de thons jaunes; les canneurs se cantonnent aux bonites (95 à 99 %) et les plangriers capturent 60 % de thons jaunes contre 25 % de bonites et 12 % de germons.

b) L'effort de pêche semble présenter une distribution saisonnière régulière : effort homogène toute l'annee pour les senneurs, effort réduit en hiver austral pour les canneurs qui remontent à cette saison vers le Japon.

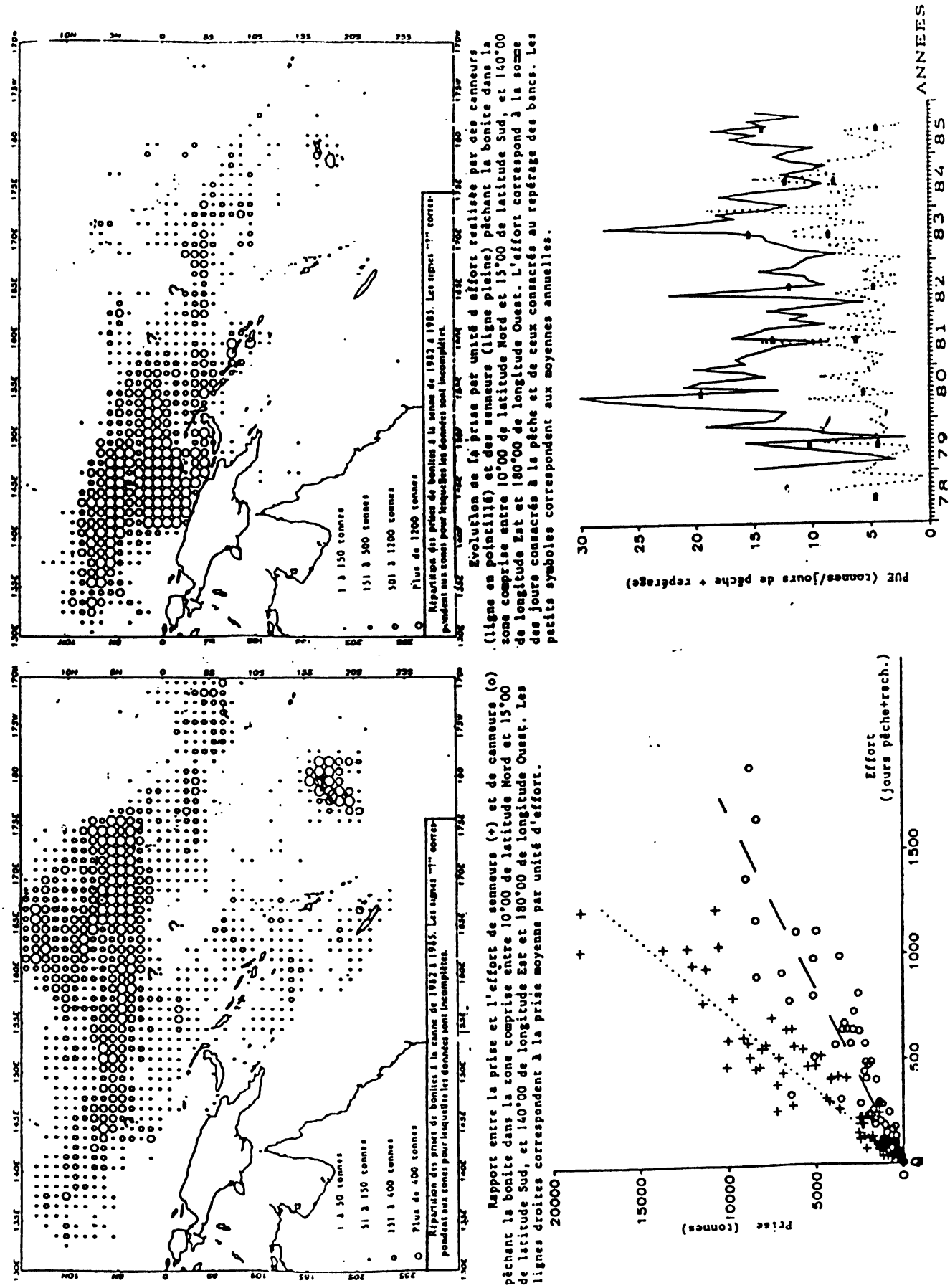
c) Quant aux rendements, ils restent egalement tres constants sur ces trois années et ne marquent pas de flechissement. Ceci tendrait à prouver que les estimations de stock et la sous exploitation que l'on en a déduit sont bien réelles, d'autant plus que les prises semblent proportionnelles à l'effort.

Les figures de synthèse 4-5 et 6 détaillent la pêcherie selon les espèces. Comme SIBERT (1986), on peut ainsi y noter que la pêche à la canne est géographiquement moins concentrée que la pêche à la senne et qu'une très forte proportion des prises est realisee dans une zone relativement petite située à l'ouest de la Micronesie et au Nord de la Papouasie Nouvelle-Guinée. Cependant, il convient de marquer une certaine prudence vis-à-vis des positions fournies dans les statistiques : quelques zones, au milieu d'une situation d'abondance présentent des prises nulles ou peu abondantes ou encore les prises suivent les contours d'une ZEE. Il s'agit là des zones de « haute mer » pour lesquelles la CPS n'a pas accès aux données.

Le thon jaune presente la particularite d'être exploite par la senne et la palangre. Depuis 1962, les rendements des palangriers n'ont fait que décroître et l'arrivee, vers 1980, des senneurs n'a pas vraiment accélere cette diminution contrairement aux prévisions de tous les modèles d'interaction entre pêcherie developpes par les dynamiciens. Actuellement, la réalite de ces interactions reste completement inconnue. Par ailleurs, si annuellement et sur l'ensemble de la région les taux moyens de prises de thons jaunes sont constants, on note cependant de fortes variations mensuelles et localisees dont l'origine devra imperativement être trouvee pour savoir s'il s'agit d'une anomalie de surexploitation ou d'une variation normale liee a l'environnement ou a la methode de peche. Enfin, comme dans les autres océans, souvent les thons obeses ou patudos sont codes « thons jaunes » dans les fiches dès qu'ils ont une certaine taille. GILLETT (1985) signale que le pourcentage d'erreur peut aller de 2 a 30 %! Ainsi, le thon jaune semble l'espece qui pose le plus d'enigmes dans cette region.

Depuis 1983, suite aux premieres pêches prospectives du N.O. CORIOLIS, affrete par l'ORSTOM, les germons du Pacifique Sud interessent les ligneurs (HALLIER et LEGALL, 1983). Les peches exploratoires menees par des compagnies americaines en 1986 et 1987, encadrees par des laboratoires Neo-Zelandais (FRD), Français (ORSTOM) et Americains (NMFS), ont donne lieu a des prises records. Bien qu'anecdotique par rapport aux autres espèces et pêcheries liees, du Pacifique occidental, ce « germon du Sud » merite que l'on suive les experimentations qu'il engendre, ne serait-ce que parce qu'il est capture dans une immense region de l'ocean quasiment vierge d'exploitation. De plus, il doit provoquer imagination et recherche compte-tenu des conditions particulieres d'exploitation qui le caracterisent (éloignement de toutes côtes, meteorologie difficile, region tres peu connue et etudiee, etc...). Cette nouvelle pêcherie suscite également un début de conflit puisqu'une vingtaine d'unites de pêche taïwanaises equipees de filet maillant tentent de l'exploiter (fevrier 1988). Les ligneurs s'opposent à ce type d'engin compte tenu de la taille jugee trop faible des prises et surtout du risque de bloquage des helices par les filets.

En conclusion, si l'on excepte le thon jaune pour lequel il est indispensable de mener rapidement des recherches structurées (dynamique et environnement) avant d'avoir une idée de l'état du stock, les perspectives de pêche pour les autres espèces sont bonnes qu'il s'agisse de la bonite encore faiblement exploitee, du thon obèse qui permet aux palangriers des prises records pour un marché en expansion (shashimi) ou du germon du sud dont la pêche de surface pourrait pren-



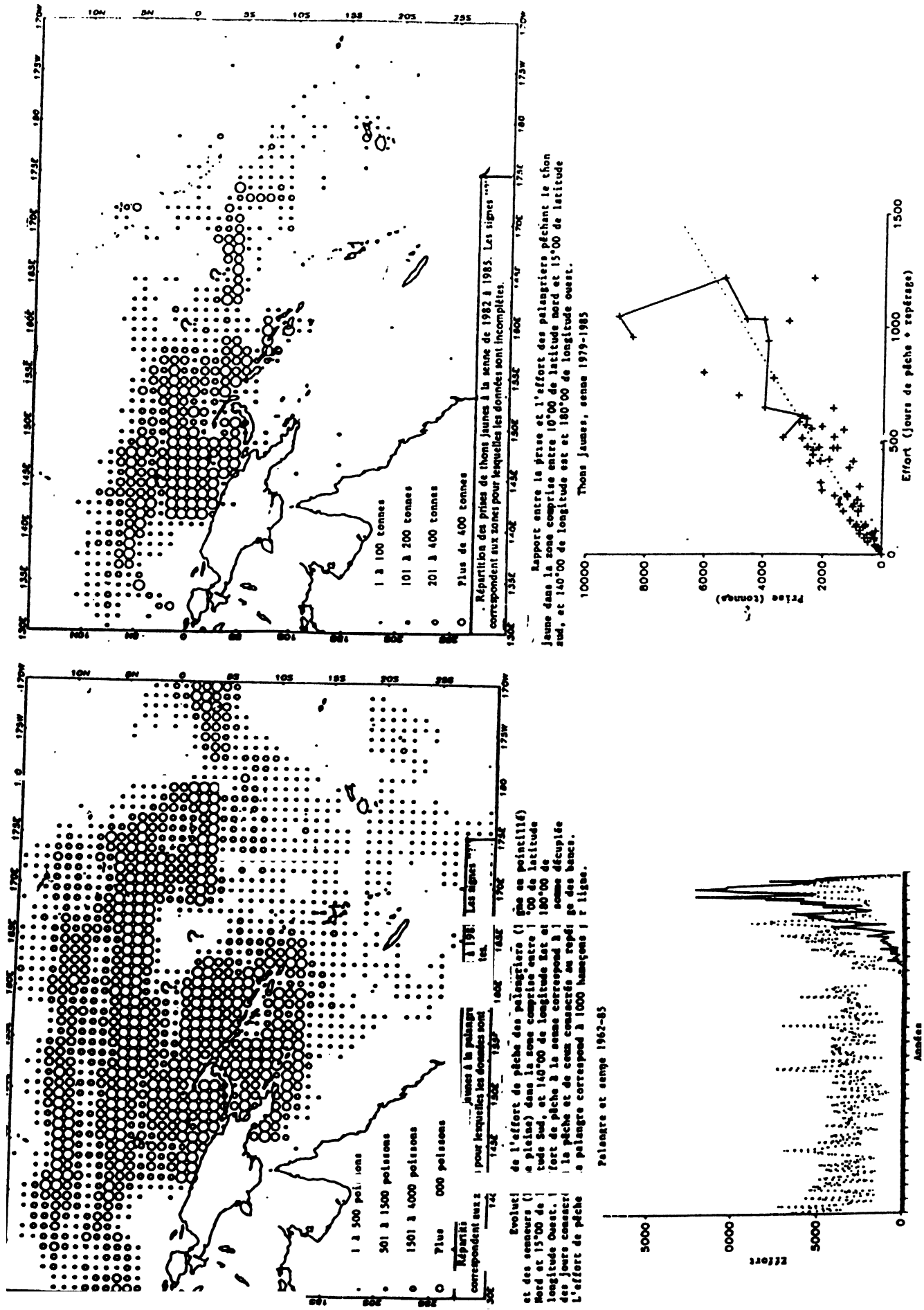
Répartition des prises de bonites à la canne de 1982 à 1985. Les signes "?" correspondent aux zones pour lesquelles les données sont incomplètes.

Répartition des prises de bonites à la senne de 1982 à 1985. Les signes "?" correspondent aux zones pour lesquelles les données sont incomplètes.

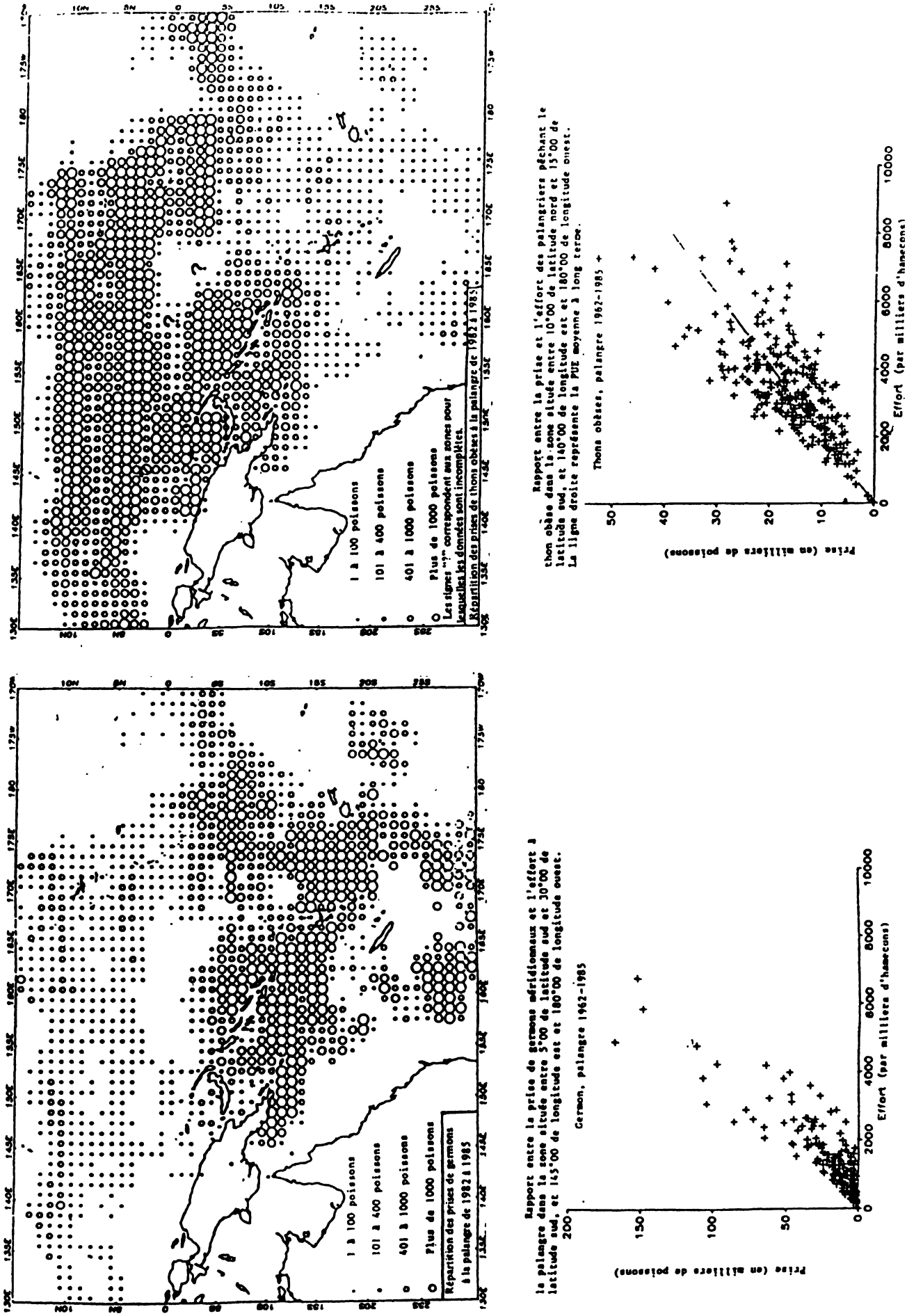
Evolution de la prise par unité d'effort réalisée par des canneurs (ligne en pointillé) et des senneurs (ligne pleine) pêchant la bonite dans la zone comprise entre 10°00 de latitude Nord et 15°00 de latitude Sud, et 140°00 de longitude Est et 180°00 de longitude Ouest. L'effort correspond à la somme des jours consacrés à la pêche et de ceux consacrés au repérage des bancs. Les petits symboles correspondent aux moyennes annuelles.

Rapport entre la prise et l'effort de senneurs (+) et de canneurs (o) pêchant la bonite dans la zone comprise entre 10°00 de latitude Nord et 15°00 de latitude Sud, et 140°00 de longitude Est et 180°00 de longitude Ouest. Les lignes droites correspondent à la prise moyenne par unité d'effort.

4.– La pecherie de bonite dans le Pacifique Occidental. D'apres SIBERT, 1986.



5.– La pêcherie de thon jaune dans le Pacifique Occidental. D'apres SIBERT, 1986.



6.– La pêcherie de thon obese et germon dans le Pacifique Occidental. D'apres SIBERT, 1986.

dre partiellement le relais de l'exploitation palangriere devenue actuellement tres faible quant a cette espece. Bien entendu, cette conclusion ne concerne que l'aspect biologique des stocks sans prejuger des resultats d'une etude economique de la part du Pacifique occidental dans le marche mondial. Ce type d'étude, qui sort de notre propos, est en cours de realisation et a fait l'objet de publications recentes (DOULMAN et KEARNEY, 1986; DOULMAN, 1987a; DOULMAN, 1987b).

3. HYDROCLIMAT ET PÊCHE THONIÈRE : des courants et des îles

Bref rappel :

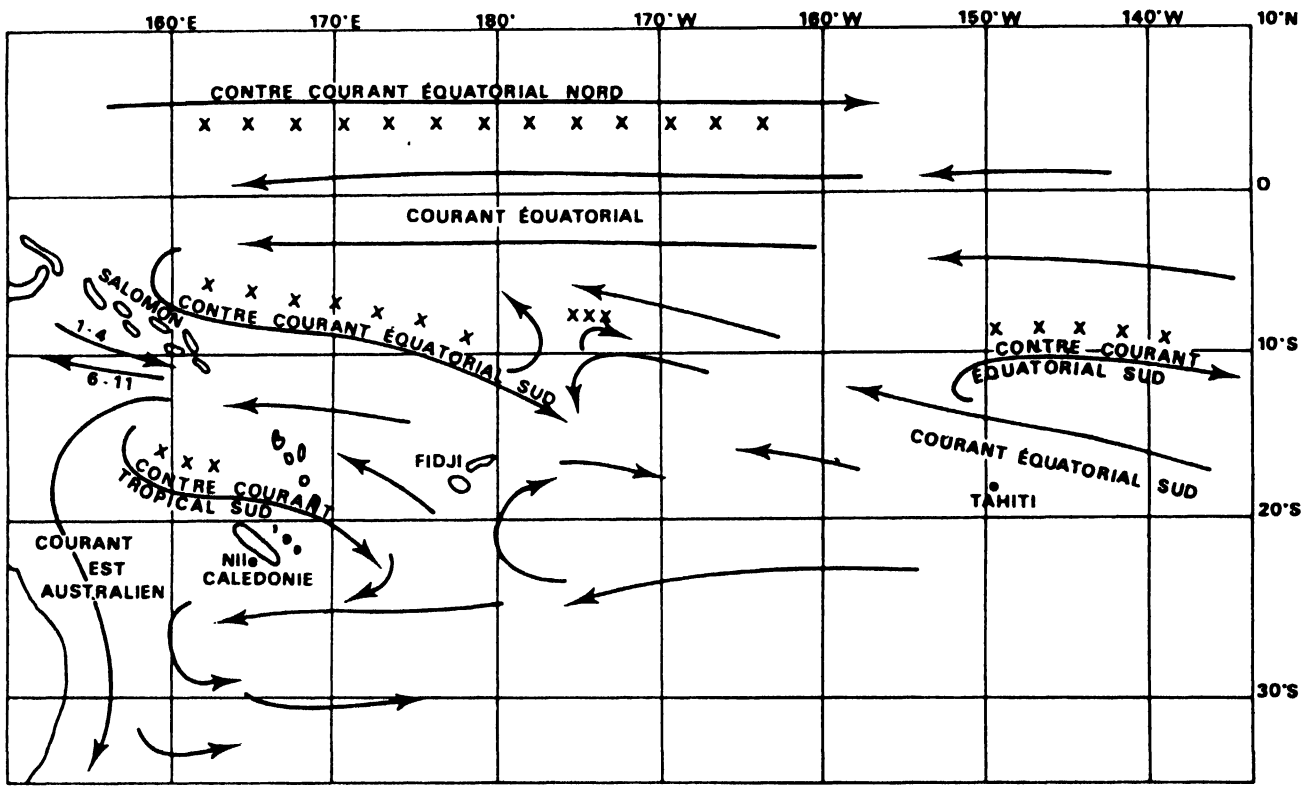
Lorsqu'on etudie les lois qui regissent la concentration des thonidés de surface, on ne peut ignorer les interactions entre tous les facteurs du milieu (temperature, oxygène, salinité, etc) (STRETTA, 1987). Ces facteurs agissent de façon synergique, c'est-a-dire que l'influence d'un facteur (la température de l'eau par exemple), à un certain niveau sera amoindrie ou renforcee selon la conjoncture definie par le niveau des autres facteurs (PETIT et HENIN, 1982). L'abondance d'une espèce, en terme de presence ou de concentration, dans un lieu donné est donc déterminee par le degre d'optimisation d'un complexe de facteurs qui approche les conditions euphoriques de l'espece en question. Ainsi, (1) l'espèce peut avoir une tolerance plus ou moins etroite selon les facteurs et (2) un facteur dans des conditions suboptimales peut modifier la tolerance de l'espece a un autre facteur.

La plupart des études ont montre que les thonides tendent a se grouper pres des régions ou les interpenetrations et melanges des masses d'eaux de caracteristiques differentes (température, salinite...) sont bien développes. Ces conditions sont réunies pres des zones a fort gradient thermique (zones frontales, ou thermocline), pres des limites des courants ou encore des iles et des hauts fonds. Une théorie unitaire récemment proposee (PETIT, 1986) sur le comportement des thonidés emet l'hypothese que dans une région où les thonides sont présents, toute anomalie détectée dans leur champ de perception (gradient thermique ou bathymetrique, epaves...) induit leur concentration. Cette theorie rappelle également une évidence souvent oubliee : une anomalie est rarement isolée et presque toujours concommittente à d'autres (front thermo-halin, upwelling et gradient colorimétrique, effets d'iles...). Enfin, elle tend à mettre en evidence le fait que les thonides, par leur adaptation physiologique, sont des animaux d'interface entre ecosystèmes.

Identification des interfaces :

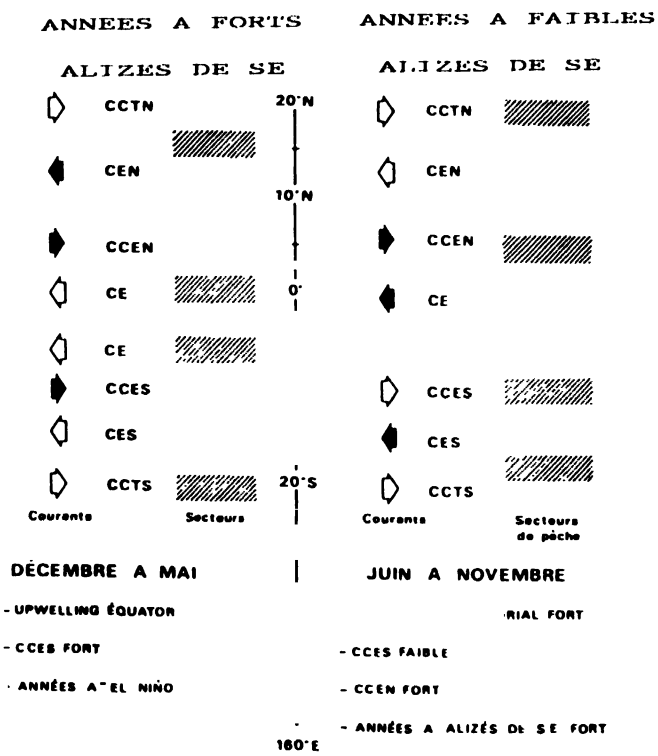
Nous nous proposons maintenant d'identifier, dans la mesure ou ils sont connus, les principaux phénomenes hydrologiques regionaux qui permettent la concentration des thonides.

Dans le Pacifique Sud-Ouest, les courants sont d'intensite variable. Marques a l'equateur, ils s'affaiblissent en zone tropicale ou l'on perd souvent leurs limites exactes. Du Nord au Sud, leur juxtaposition et leur difference de secteur induisent une succession de divergences et de convergences moins intenses et de localisation plus floue que dans le Pacifique Nord, mais neanmoins suffisantes pour concentrer les thonides.



7.– Schema de la circulation des courants de surface dans le Pacifique Sud Ouest et zones de convergence deduites XXX. (D'apres Marcille et Bour, 1981).

MARCILLE et BOUR (1981) ont regroupé selon deux situations types (fig. 8) la répartition des secteurs de pêche à la bonite en fonction des systèmes courants-contre-courants en place (fig. 7). La première situation correspond à un régime d'alizés de Sud Est fort, donc le plus souvent entre juin et novembre; les pêches se situent alors surtout dans les contre-courants équatoriaux Nord et Sud, le courant équatorial Sud et le contre-courant tropical Nord. La seconde situation schématisée est celle des alizés faibles c'est-à-dire de la période de décembre à mai ou encore des années à El Nino : les pêches se cantonnent alors davantage dans le courant équatorial lui-même et dans le contre-courant tropical Sud.



8.— Principaux secteurs de pêche à la bonite par rapport au courant selon les régimes de vent. (D'après Marcille et Bour, 1981).

A la limite de la zone intertropicale, en été austral, les fronts thermiques développés permettent la concentration des bonites et des germons. Ces concentrations sont nettement accrues près des upwelling côtiers (Ile Nord de la Nouvelle-Zélande, Nouvelles Galles du Sud en Australie). Les jeunes thons jaunes restent à la même époque plus au Nord vers l'isotherme 23°C.

Dans le Pacifique Central Sud, la circulation est encore plus mal connue. La répartition saisonnière des gradients thermiques remarquables à la limite de la zone intertropicale a été évoquée dans PETIT et KULBICKI (1982). Au Nord de cette région, les zones à mouvements verticaux (doming et upwelling) semblent rares : si l'on excepte la bande équatoriale, on ne connaît que le doming associé à la limite Sud du contre-courants des MARQUISES.

Les études récentes sur la nourriture des thons et la recherche de cette nourriture (OLSON et BOGGS, 1986; STRETTA, 1986; PETIT, sous presse) ont établi clairement le caractère essentiel de ce paramètre tant pour expliquer la présence que la concentration des thonidés. Compte-tenu des productivités primaires et secondaires mesurées, les populations de prédateurs pélagiques tertiaires qu'est susceptible de supporter le Pacifique Central semblent réduites. Cependant, il existe des phénomènes liés aux îles, aux hauts fonds ou aux lagons (effet d'îles, endo-upwelling, etc...) que l'on ne connaît que ponctuellement et relativement mal. A l'heure actuelle, dans notre zone d'étude parsemée de milliers d'îles, la part de ces phénomènes par rapport aux autres interfaces déjà vues et leur influence globale relative n'ont jamais vraiment été étudiées.

4. CONCLUSION :

Révélées par les pêches exploratoires des bateaux japonais, soupçonnées par les programmes scientifiques (marquages de la CPS, campagnes de radiométrie aérienne de l'ORSTOM, campagnes océanographiques diverses...) les potentialités en matière de pêche thonière du Pacifique occidental se sont avérées exactes, grâce à la senne, en un laps de temps très court et jamais observé jusqu'alors dans le domaine des pêches. Ceci n'est pas sans engendrer des problèmes logistiques, économiques et biologiques.

Pour diverses raisons, (difficultés d'obtention de données statistiques, manque de données d'environnement et variabilité spatio-temporelle forte des prises et de l'effort, etc...) les modèles classiques en halieutique ont des difficultés à assumer le contrôle de l'ensemble de la pêcherie. Le thon jaune, doublement exploité (senne et palangre) en est un exemple typique.

Pour pallier cette insuffisance et tenter de détecter tout signe de surexploitation, le renforcement du traitement des données statistiques et le développement des études d'environnement sont indispensables à très brève échéance. Pour ces dernières, la possibilité d'utiliser des données de télédétection aérospatiale constituera un élément primordial (voir PETIT *et al* dans ce même ouvrage).

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANONYME, 1986 — Couverture des prises des PPPH par la CPS dans sa zone d'action. 18ème Conference des Pêches. CPS Nouméa.

DOUMENGE F., 1987 — Les relations exterieures de l'halieutique japonaise. Etudes internationales volume XVIII n° 1, mars 1987.

DOULMAN D. et R. KEARNEY, 1986 — The Domestic Tuna Industry in the Pacific Islands Region PIDP publication research report series n° 7 East West Center.

DOULMAN D., 1987a — Tuna Issues and Perspectives in the Pacific Is Lands Region Librairy of Congress East West Center publication.

DOULMAN D., 1987b — The développement of the tuna Industry in the Pacific Islands Region : an analyse of options PIDP Publication. East West Center.

FELANDO A., 1987 — Historical overview of the U.S. Tuna fleet ventures int the Pacific Islands. 38th Annual Tuna Conference Lake Arrowhead — NMFS — La JOLLA.

GILLETT R.D., 1985 — Observer trip on US purse seine vessels. (Nov-Dec 84). Tuna and Billfish Assessment Programme. Tech. rep. n° 15, CPS Noumea.

HALLIER J.P. et J.Y. LEGALL, 1983 — Campagne exploratoire de pêche aux germons de surface dans l'Ocean Pacifique Sud. Lettre d'information sur les pêches n° 24, Janv-Mars 83. CPS Nouméa.

KEARNEY R.E., 1983 — Evaluation des ressources du Pacifique central et occidental en bonites et en appâts : resume de Programme d'etude et d'evaluation des stocks de bonites. Commission du Pacifique Sud, Noumea, Nouvelle-Caledonie. Version française. 37pp.

MARCILLE J. et W. BOUR, 1981 — La pêche des thons a la senne et à la canne dans l'Océan Pacifique Tropical. Trav. et Doc. de l'ORSTOM n° 134.

OLSON R.J. et C.H. BOGGS, 1986 — Apex predation by yellowfin tuna : independant estimates from gastric evacuation and stomach contents, bioenergetics and cesium concentrations. Can. J. Fish. Aquat. Sci (43) : 17 60-75.

PETIT M. et C. HENIN, 1982 — Radiometrie Aerienne et Prospection Thoniere Rapport Final Vanuatu. Notes et doc. d'ocean. n° 3 ORSTOM Port-Vila.

PETIT M. et KULBICKI, 1982 — Radiométrie Aerienne et prospection thonière dans la ZEE de Polynesie française, Note et doc. Ocean. n° 20, ORSTOM TAHITI.

PETIT M., 1984 — La pêche des thoniers senneurs dans le Pacifique Tropical Ouest. La pêche maritime Nov. 84.

PETIT M., 1986 — Coherent theory on tuna behaviour. 37th Annual Tuna Conference Lake Arrowhead. NMFS LA JOLLA.

PETIT M., 1987 — Tuna school size : its role in the optimal predation strategy and an indication of tropical water ressources (38th Annual Tuna Conference Lake Arrowhead - NMFS LA JOLLA).

ROUX J.C., 1986 — Notes et reflexions sur la valeur geostrategique des iles du Pacifique. Doc du Centre ORSTOM de Noumea.

SIBERT J., 1986 — Les stocks de thonides du Pacifique Sud-Ouest. 18eme Conf Techn regionale des pêches WP1. version française, CPS Noumea.

STRETTA J.M., 1986 — Regime et comportement alimentaire de l'albacore, du listao et du patudo dans l'Atlantique tropical oriental (Revue bibliographique). Rec. Doc. Scient. ICCAT Vol XXVI (1) : 95-104. (Document SCRS/86/32).

STRETTA J.M., 1987 — Environnement et Pêche thoniere en Atlantique Tropical Oriental (chapitre 7 de la synthese Thon-Atlantique. FONTENEAU et MARCILLE. Editeurs, Edition FAO/ORSTOM 269-308.

3. Bases physiologiques de la thermoécologie des thons

3.1. Physiologie de la thermorégulation des thons

par Patrice Cayré*

* Oceanographe biologiste de l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Developpement en Cooperation), Fisheries Research Centre, Albion, Petite Riviere, Ile Maurice

1. INTRODUCTION

Selon le seul critère du rapport entre la temperature interne du corps et celle du milieu environnant, on peut diviser les vertèbres en deux groupes :

– les poikilothermes dont la temperature interne est égale à celle du milieu ambiant et donc varie comme cette derniere (ex. reptiles, poissons);

– les homeothermes dont la temperature reste plus ou moins constante quelque que soit celle du milieu environnant (ex. mammiferes).

Le processus physiologique qui permet le contrôle de la temperature interne est designe par le terme de « thermoregulation »; il est a souligner que ce terme n'est le plus souvent utilise que pour designer l'ensemble des mecanismes internes de conservation de la chaleur propres aux homéothermes.

Chez les poissons, toute la chaleur produite par le fonctionnement du metabolisme, et vehiculee par le sang, est dissipee au niveau des branchies. Cependant, depuis la plus haute antiquite, on peut trouver des observations selon lesquelles la chair de thons fraichement captures semble plus chaude que l'eau dans laquelle ces poissons ont eté pêches. La premiere personne à decrire précisement ce phénomene est le physicien anglais Davy; ce dernier relate en effet avoir mesuré des ecarts d'environ 10°C entre la température de l'eau de mer et celle de la chair de certains thons (Davy, 1835). Ce n'est qu'en 1923 que le biologiste japonais Kishinouye met en relation cette faculté des thons a maintenir une chaleur interne superieure a celle de leur environnement, avec la presence chez ces especes d'un système circulatoire tres particulier qu'il designe comme « système vasculaire echangeur de chaleur par circulation à contre-courant » (ou *rete mirabile).* Cette faculté de conserver la chaleur produite par le métabolisme ou du moins de ne la dissiper qu'avec un certain retard, et la présence de ce système vasculaire tres particulier sont propres aux thons (et à certains requins : *Lamnidae)* et uniques dans le monde des poissons. Chez les thons, l'existence de ce système circulatoire particulier se materialise donc par un excès de chaleur des muscles par rapport a la température du milieu. C'est ainsi que l'on a pu mesurer sur des individus venant d'être captures des excès de température interne pouvant aller jusqu'à 21°5 chez le thon rouge, *Thunnus thynnus thynnus,* (Carey *et al.,* 1971), jusqu'a 6°5 chez l'albacore (*Thunnus albacares)* et 11°7C chez le listao, *Katsuwonus pelamis,* (Barrett and Hester, 1964; Stevens and Fry, 1971).

Par ailleurs, il est remarquable qu'au sein de la famille des scombrides la seule presence de ce système échangeur de chaleur permette de distinguer l'ensemble des 13 especes de thons (groupe des thunnini) de toutes les autres especes de cette famille (Kishinouye, 1923; Gibbs and Collette, 1967; Collette, 1978).

Dans ce chapitre, apres une description schematique du principe du systeme échangeur de chaleur des thons, nous nous attacherons a souligner les differences qui existent entre les divers systemes echangeur de chaleur et permettent de distinguer trois groupes d'espèces chez les thons. Nous enumererons ensuite les avantages ou les contraintes que ces systemes echangeurs de chaleur semblent impliquer, avant d'evoquer en conclusion comment ils peuvent jouer un rôle sur le comportement et la répartition des especes.

2. PRINCIPE DU SYSTEME ECHANGEUR DE CHALEUR DES THONS

Le principe du systeme circulatoire echangeur de chaleur mis en evidence par Kishinouye (1923), peut être schematise de la maniere suivante : le sang, chauffé par l'activite metabolique, est dirige par les veines vers les branchies pour y être reoxygene; ce sang veineux chaud va donner une partie de sa chaleur au sang bien oxygene, mais plus froid, qui vient des branchies et se dirige, dans les artères, vers les muscles. Cet echange de chaleur peut se faire grâce à l'existence d'un echeveau de vaisseaux capillaires, très fins et très rapproches, dans lequel les capillaires veineux, qui transportent le sang « chaud », croisent en un reseau compliqué et dense les capillaires arteriels qui amènent le sang « frais ». Comme la circulation du sang dans les deux reseaux, arteriel et veineux, se fait en sens inverse, il y a echange de chaleur entre le sang veineux « chaud » et le sang artériel « froid ». L'écoulement du sang dans ces deux types de capillaires est ralenti par la complexité même du réseau, ce qui favorise l'echange de chaleur.

Après Kishinouye ce n'est que dans les années soixante et soixante-dix que plusieurs auteurs ont pu

réellement mesurer avec précision les écarts de température entre l'eau et le sang de diverses espèces de thons récemment capturés, ou observés directement en mer au moyen de marquages acoustiques, et analyser finement le système circulatoire de ces espèces (Barrett and Hester, 1964; Carey and Teal, 1966; Carey *et al.*, 1971; Stevens and Fry, 1971; Stevens *et al.*, 1974). Par ailleurs de nombreux travaux se sont attachés a préciser les mécanismes intimes permettant la conservation de chaleur en relation avec le métabolisme des thons, et d'en analyser les conséquences sur le comportement et la répartition de ces espèces (Neill *et al.*, 1972; Neill and Stevens, 1974; Dizon *et al.*, 1974; Graham, 1973, 1975; Neill *et al.*, 1976; Dizon *et al.*, 1976, 1977, 1978; Barkley *et al.*, 1978; Brill, 1978; Brill *et al.*, 1978; Graham and Diener, 1978; Sharp and Vlymen, 1978; Stevens and Carey, 1981).

3. DESCRIPTION DU SYSTEME VASCULAIRE ECHANGEUR DE CHALEUR

Ce système, dont la description générale est donnee en introduction peut se trouver en trois endroits différents du corps ce qui conduit à distinguer trois types d'échangeurs de chaleur :

— *un système échangeur de chaleur latéral* ou SEC (figure 1) composé d'un ou deux *rete mirabile*, localisés sur chaque coté du corps et dans chacun desquels des capillaires arteriels et veineux issus d'une artère cutanee et d'une veine cutanee, s'entrecroissent. L'anatomie de l'ensemble du système (origine des arteres cutanees, raccordement des veines cutanées, association des capillaires...) et l'importance de son developpement permettent de distinguer et de classifier (phylogénie) les differentes espèces de thons (figure 1).

— *Un système échangeur de chaleur central* ou SEC situe sous la colonne vertebrale dans l'arc hemal (figure 1) et dont le *rete mirabile* est formé par l'association de capillaires veineux reliés à la veine cardinale posterieure et de capillaires artériels issus de l'aorte dorsale. L'importance et l'agencement du *rete mirabile*, l'association plus ou moins etroite de l'aorte dorsale et de la veine cardinale posterieure, et la position plus ou moins proche du SEC de la face ventrale des vertebres dans l'arc hemal, ainsi que tout simplement la presence ou l'absence de l'ensemble de ce systeme échangeur de chaleur central, sont également des élements caracteristiques des différentes espèces de thons.

— *Un système échangeur de chaleur viscéral* (SEV) situé sur la face ventrale du foie et composé de plusieurs *retia mirabilia*, ou cônes vasculaires (1 a 5 cônes par lobe du foie), associant les vaisseaux sanguins qui courent sur les faces ventrales des lobes du foie aux faces dorsales de chacun de ces lobes. La presence ou l'absence de ce système permet aussi de repartir les thons en deux groupes distincts.

4. CLASSIFICATION DES THONS BASEE SUR LE SYSTEME ECHANGEUR DE CHALEUR

La présence d'un système échangeur de chaleur latéral (SEL) est caracteristique de toutes les espèces de thons (Thunnini). Le développement plus ou moins important de ce système permet de classer phylogénétiquement les differentes especes de thons (figure 1). Le genre le plus primitif est *Auxis* qui n'a qu'une paire d'artères cutanées; chez les autres espèces, le SEL et la vascularisation cutanee sont de plus en plus développes quand on passe du listao, *Katsuwonus* (2 paires d'arteres cutanées), puis successivement aux différentes especes du genre *Thunnus* a savoir l'albacore (*T. albacares*), le patudo (*T. obesus*) et le thon rouge (*T. Thynnus*). Ce développement du SEL semble aller de pair avec une reduction de l'importance du systeme échangeur de chaleur central (Sharp et Pirages, 1978). Celui-ci est pratiquement absent chez le patudo et inexistant chez le thton rouge espece chez laquelle il n'y a pas de veine cardinale postérieure.

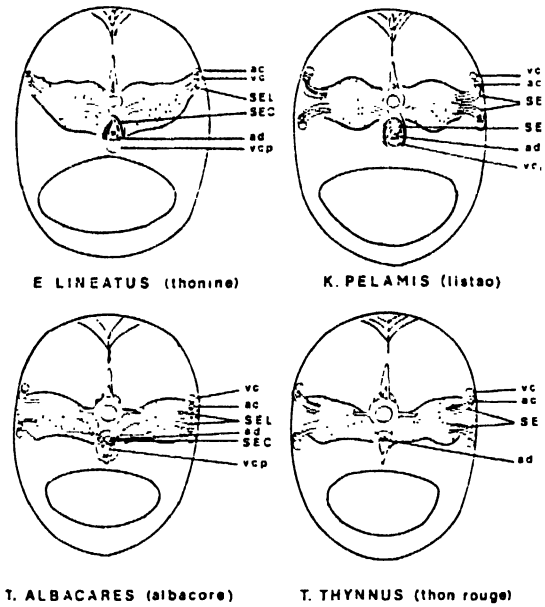


Figure 1 — Coupes transversales du corps de quatre especes de thons qui montrent schematiquement la position des echangeurs de chaleur lateraux (SEL) et centraux (SEC) ainsi que celle des muscles rouges (parties hachurees) et de differentes parties du systeme sanguin (ad : aorte dorsale, vcp : veine cardinale posterieure, vc : veines cutanees, ac : arteres cutanees) (d'apres Graham, 1975)

La presence ou l'absence d'un système échangeur de chaleur central a permis de distinguer deux groupes de thons (Gibbs and Collette, 1967) :

— un groupe à affinités tempérées ou groupe thon rouge *T. thynnus*, *T. alalunga*) qui n'a pas de SEC;

— un groupe à affinites tropicales ou groupe albacore (*Auxis*, *Euthynnus*, *Katsuwonus*, *T. albacares*).

Le patudo (*T. obesus*) serait intermediaire à ces deux groupes en raison du developpement pratiquement nul de son SEC, et de la présence, comme chez le thon rouge d'un système échangeur de chaleur viscéral (SEV).

A l'interieur du groupe albacore le developpement du SEC, ainsi que la disposition et l'importance des muscles rouges (Shap et Pirages, 1978) permettent de distinguer les espèces cotières peu migratrices auxide et thonine (*Auxis*, *Euthynnus*), des espèces hautement migratrices à vaste aire de répartition comme l'albacore (*T. albacares*) et le listao (*K. Pelamis*); la disposition des muscles rouges de l'albacore (en contact avec la surface du corps) permet de dire qu'à taille égale l'albacore est une espèce plus tropicale et moins cosmopolite que le listao (Sharp et Pirages, 1978).

5. LA THERMOREGULATION CHEZ LES THONS : MECANISMES, INTERET

5.1. Mécanismes de la thermorégulation chez les thons

Nous avons vu schématiquement que le rôle principal et apparemment unique du système echangeur de chaleur est de conserver à l'intérieur du corps une partie de la chaleur produite par l'activité metabolique (muscles), ce qui, à partir d'un certain niveau d'activite, peut conduire à ce que la température interne soit superieure à la température externe de l'environnement. La température interne des thons semble ainsi conditionnee par le niveau d'activité de l'individu et par la température de son environnement. Dans ces conditions de conservation permanente de la chaleur metabolique, la température interne des thons devrait, en cas d'intense activité soutenue pendant une longue periode (cas frequent chez les thons), atteindre des valeurs fatales pour les individus. On comprend alors la necessite absolue que cette élévation de temperature interne puisse être contrôlée, notamment lors d'evolutions en eaux chaudes, par un mécanisme quelconque afin qu'elle ne s'élève pas au-delà d'un certain seul; c'est le mecanisme de contrôle que l'on désigne par le terme « thermoregulation », et qu'il semble logique d'invoquer chez les thons. Cette thermorégulation semble realisee de deux manieres différentes par les thons : par modification du comportement et/ou modifications physiologiques internes.

— *Thermoregulation par comportement*

Si l'on s'en tient au seul rôle du systeme echangeur de chaleur evoque jusqu'a present (conservation d'une partie de la chaleur metabolique), plusieurs mecanismes de thermorégulation peuvent être invoques conjointement ou non : nous les regroupons ci-dessous sous le terme *« thermorégulation par comportement »* car tous font intervenir un mouvement ou une activite volontaire des individus. Ces mecanismes sont :

— des deplacements verticaux du poisson, qui le font passer alternativement des aux chaudes de surface aux eaux plus froides, des couches d'eaux profondes. De tels mouvements ont été clairement mis en evidence par des expériences de marquages acoustiques conduites entre autres sur les trois especes, albacore, listao et patudo (Yuen, 1970; Dizon et *al.*, 1978; Carey and Olson, 1982; Levenez, 1982; Yonemori, 1982 Cayré *et al.*, 1986, Cayre et Chabanne, 1987);

— modification de la vitesse : ralentissement de nage pour diminuer la quantite de chaleur produire ou accelération de la nage pour accroitre la quantité de chaleur dissipée à l'extérieur;

— augmentation de la surface du corps par laquelle une grande partie de la chaleur peut être dissipee à l'extérieur (Brill, *et al.*, 1978), notamment par le déploiement des nageoires dorsales ou par tout autre moyen qui peut accroître la turbulence de l'eau autour du corps.

Cependant aucune de ces tactiques de thermorégulation ne semble elle-même reellement suffisante pour dissiper les fortes quantites de chaleur produites a de hauts niveaux d'activite notamment dans des eaux tropicales (Dizon et al., 1978; Sharp and Vlymen, 1978). Par ailleurs, certaines de ces tactiques semblent peu conciliables avec la biologie des thons qui, grands pelagiques migrateurs, sont toujours à la recherche d'un maximum d'efficacite de leur nage.

Partant de l'observation selon laquelle le problème de dissipation de la chaleur se pose surtout pour les especes qui frequentent habituellement les eaux tropicales (Auxide, thonine, albacore, listao) et que ce n'est que chez ces especes que l'on observe la presence d'un système echangeur de chaleur central, Sharp et Vlymen (1979) ont été amenes a postuler l'idee selon laquelle ce systeme servirait ou participerait a un processus tendant plutôt a faire baisser la chaleur qu'à la conserver; ce processus pourrait se realiser si comme le suggerent Sharp et Vlymen le système echangeur permettait en fait une conduction acceleree du sang dirigee sur les branchies, lieu essentiel de dissipation de la chaleur.

— *Thermorégulation physiologique*

Dizon, Brill et Yuen (1978), constatant que les thons doivent parfois dissiper au maximum la chaleur produite (a niveau d'activite eleve), ou au contraire conserver cette chaleur, ont ete amenes a postuler l'existence d'une veritable thermoregulation physiologique chez ces espèces. Leur postulat repose a l'origine sur des expérimentations et observations directes faites sur des thons (listao) maintenus en captivite dans des bassins; ces auteurs se sont aperçu :

— d'une part que des modèles de predictions de la température interne des animaux observes semblaient indiquer que l'efficacité du système echangeur de chaleur pouvait varier de 17 a 47 % et que ceci expliquerait que les temperatures internes observees sont souvent inferieures a celles predites par les modeles;

— d'autre part aucun des modeles utilises ne peut clairement decrire les relations complexes (et tres variables) entre la temperature interne, la vitesse de nage et la température du milieu environnant.

Ils admettent alors que pour les thons le moyen le plus simple pour resoudre les problèmes de retention ou de dispersion de la chaleur selon les besoins, est de pouvoir arrêter a volonté ce systeme echangeur de chaleur. C'est cette faculte de decouplage du systeme echangeur de chaleur qui permettrait alors la thermoregulation des thons.

Bien, que les mecanismes physiologiques de cette thermoregulation restent encore largement mal elucides, deux processus semblent intervenir :

— le premier mecanisme permet de limiter la quantité de chaleur produite par amélioration de l'efficacite de la nage; ainsi lors de periodes d'intense activite, ce sont les muscles blancs qui entrent en jeu; ceux-ci fonctionnent pour une large part de manière anaérobique (ce qui tend a diminuer la consommation d'oxygène), et produisent donc beaucoup moins de chaleur que les muscles rouges; de plus ils ne sont pas relies au système circulatoire echangeur de chaleur;

— selon le second mécanisme, encore largement hypothétique, le système échangeur de chaleur permettrait dans certains cas, à de plus importantes quantités de chaleur de se dissiper au niveau des branchies.

5.2. Intérêt de la conservation de la chaleur

La quantité de chaleur métabolique produite est fonction de l'intensité du travail musculaire. On a pu calculer que 80 % de l'énergie dépensée par un listao est transformée en chaleur, seuls les 20 % restant servant réellement à la propulsion de l'animal (Webb, 1975). En conséquence, plus un thon va nager vite plus il va produire de chaleur. Cette observation a conduit de nombreux auteurs à faire l'hypothèse que le principal intérêt pour les thons de conserver la chaleur etait de faciliter le travail musculaire et d'assurer une vitesse de nage soutenue maximale (Carey et *al.*, 1971).

D'autres avantages directement liés au maintien d'une temperature relativement chaude ou a l'inertie thermique qu'engendrent les systèmes échangeurs de chaleur ont été avancés :

— permettre une souplesse certaine sur le contrôle d'un métabolisme eleve tel que celui des thons (Hochachka *et al.*, 1978);

— faciliter la diffusion de l'oxygene de la myoglobine vers les mitochondries des cellules musculaires qui travaillent (Stevens and Carey, 1981);

— permettre une certaine independance vis-a-vis des variations exterieures de la temperature et par la faciliter les déplacements dans des milieux aux caracteristiques contrastees (Graham, 1975);

— augmenter la rapidite de digestion en maintenant une temperature assez élevee des visceres (Magnuson, 1969).

En guise de conclusion à ces deux paragraphes, il convient de remarquer que les differents avantages (évoqués ci-dessus) pour les thons du maintien d'une température interne relativement élevee et surtout l'importance relative de ces différents avantages, restent encore largement des hypotheses a démontrer. En fait, la principale question qui reste encore a l'heure actuelle à élucider est directement liée au fonctionnemnt et au rôle du système échangeur de chaleur si l'on se refère notamment aux thons tropicaux qui evoluent dans des eaux dont la température est relativément elevee (superieure à 20°C).

6. CONCLUSION : THERMOREGULATION ET REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES THONS

Bien que le rôle des sytèmes vasculaires echangeurs de chaleur, et surtout leur implication dans un ensemble visant à assurer une certaine thermoregulation chez les thons, restent encore à préciser, il est indeniable que la structure et le développement de ces systèmes, associés à la disposition des muscles rouges, ont des implications directes sur l'écologie des thons.

Pour illustrer ce rôle du système échangeur de chaleur sur le comportement on peut mentionner plusieurs exemples :

— pour les pêcheurs sportifs, la nature ou le développement du système échangeur de chaleur joint à la température du milieu au moment de la capture semblent influer directement sur la combatitivité des différentes espèces de thons; le thon, rouge dont le système échangeur de chaleur est le plus sophistiqué serait ainsi toujours plus combatif qu'un albacore ou qu'un patudo par exemple. Des cas de poissons capturés après un combat intense et montes à bord morts avec la chair anormalement molle peuvent s'expliquer par l'impossibilité de ces individus d'accomplir une thermorégulation suffisante dans des conditions extrêmes et anormales d'activité. Les thons présentant cette chair ramollie sont parfois observes à l'occasion de gros coups de senne, et sont designes par le terme anglais de « burnt tunas ». Ces individus peu prises par les conserveries sont totalement impropres a la consommation crue sous forme de « Sashimi », très apprécié des japonais. Il est d'ailleurs assez remarquable que sur le marché japonais les espèces de thons qui ont la plus grande valeur commerciale soient justement les espèces dont le systeme échangeur de chaleur est le plus efficace (patudo, thon rouge) et chez lesquelles le phénomène de « burnt tunas » est rarement observé.

Les differentes caracteristiques du système échangeur de chaleur permettent en grande partie de comprendre les affinités écologiques (en regard de la temperature du milieu) des diverses especes de thons ou, au sein d'une même espèce, des differentes gammes de taille de l'espèce considérée. On peut ainsi séparer :

— les petits thons côtiers et à affinite strictement tropicale : *Auxis* (auxide), *Euthynnus* (thonine).... especes dont le systeme echangeur de chaleur central est bien developpe, le systeme échangeur de chaleur lateral tout juste fonctionnel, et qui possèdent d'importants muscles rouges (ayant une large surface de contact avec l'exterieur.

— les jeunes individus (LF < 70 cm) a affinité tropicale quasi-exclusive : *T. albacares* (albacore) et *T. obesus* (patudo), dont les systemes echangeurs de chaleur sont encore mal developpes par rapport a celui des adultes;

— les albacores adultes à affinité tropicale, mais moins marquée que celle des jeunes, en ce sens qu'ils sont fréquemment observes aux limites horizontales et verticales de l'habitat de l'espece dans des eaux a 15°C – 20°C;

— les especes cosmopolites comme le listao (*K. pelamis*), dont l'aire de repartition déborde largement des seules regions tropicales;

— les patudos adultes a affinité plutôt temperee 10°C-18°C, (contrairement aux jeunes de l'espèce) et que l'on rencontre le plus souvent dans les eaux froides (10-15°C) de profondeur (300-400 m) dans les régions strictement tropicales, ou dans celles de surface des regions nord et sud de l'habitat de l'espece;

— les thons a affinite temperee assez stricte (12°-18°C) comme le germon (*T. alalunga*), ou temperees mais tres cosmopolite (5°-28°C) comme le thon rouge (*T. thynnus*) qui est l'espece de thon phylogenetiquement la plus avancee.

On comprend alors bien l'importance et l'intérêt de connaitre les phenomenes de thermorégulation chez les thons puisqu'ils influencent directement la répartition verticale et horizontale (biogéographie) des différentes especes.

Ces connaissances sur la thermorégulation des différentes espèces permettent de mieux comprendre certaines caractéristiques des pêcheries thonières telles que les zones préferentielles d'abondance apparente ou de bonne capturabilité de chaque espèce, voire au sein d'une espèce donnée les repartitions respectives des jeunes et des adultes.

REFERENCES

BARKLEY R.A., W.H. NEILL and R.M. GOODING, 1978. Skipjack tuna, (*Katsuwonus pelamis*), habitat based en temperature and oxygene requirement. Fish. Bull., US 76 (3) : 653-662.

BARRET, I. and F.J. HESTER, 1964, Body temperature of yellowfin and skipjack tunas in relation to sea surface temperature Nature, London 203; 96-97.

BARKLEY R.A., W.H. NEILL and R.M. GOODING; 1978. Skipjack tuna, (*Katsuwonus pelamis*), habitat based on temperature and oxygen requirements. Fish. Bull., 76 : 653-662.

BRILL R.W., 1978. Effects on speeds of muscle contraction and stasis metabolic rate. In GD Sharp and AE DIZON, (editors) « The physiological ecology of tunas » : 277-283. Acad. Press. NY.

BRILL R.W., GUERNSEY, D.L. and E.D. STEVENS, 1978. Body surface and gill heat loss rates in restrained skipjack tuna. In GD Sharp and AE Dizon (editors) « The physiological ecology of tunas » : 261-276. Acad. Press. NY.

CAREY G.S. and J.M. TEAL, 1966. Heat conservation in tuna fish muscle. Proc. Nat. Acad. Sci : 191-195.

CAREY F.G., J.M. TEAL, J.W. KANWISHER, K.D. LAWSON and K.S. BECKETT 1971. Warm-bodied fish. Am. Zool. 11 : 137-145.

CAREY F.G. and R.J. OLSON, 1982. Sonic tracking expriments with tunas. ICCAT, col. vol. of Sci. Pap., XVIII (2) : 458-466.

CAYRE P. et J. CHABANNE, 1987. Marquage acoustique et comportement de thons tropicaux (albacore : *Thunnus albacares*, et listao *Kasuwonus pelamis*) au voisinage d'un dispositif concentrateur de poissons. Oceanogr. trop. 21 (2) : 167-183.

COLLETTE B.B., 1978. Adaptations and systematics of the mackerels and Tunas. *In* GD SHARP and AE DIZON (editors) : « The physiological ecology of tunas » : 7-39. Acad. Press. NY.

DAVY, J., 1835. On the temperature of some fishes of the genus thunnus. Proc. Roy. Soc (London) : 327-328.

DIZON A.E., E.D. STEVENS, (J.H. NEILL and J.J. MAGNUSON, 1974. Sensivity of restrained skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) to abrubt increases in temperature. Comp. Biochem. Physiol., 49 A : 291-299.

DIZON A.E., BYLES T.C. and E.D. STEVENS, 1976. Perception of abrupt temperature decrease by restrained skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*. J Thermal Biol. 1 : 185-187.

DIZON A.E., NEILL W.H. and J.J. MAGNUSON, 1977. Rapid temperature compensation of volitional swimmling speeds and lethal temperatures in tropical tunas (Scombridae). Environ. Biol. Fish., 2 : 83-92.

DIZON A.E., R.W., BRILL and H.S.H., YUEN, 1978. Correlations between environment, physiology and activity and the effect on thermoregulation in skipjack tuna. In GD Sharp and AE DIZON (editors). « The physiological ecology of tunas » : 233-259. Acad. Press. NY.

DIZON A.E., R.W. BRILL and H.S.H. YUEN, 1978. Correlations between environment, physiology and activity and the effect on thermoregulation in skipjack tuna. In GD Sharp and AE DIZON (editors), « The physiological ecology of tunas » : 233-259. Acad. Press. NY.

GIBBS R.H. (J.R.) and B.B. COLLETTE, 1967. Comparative and systematics of the tunas, genus *Thunnus*. US. Fish Wildl. Serv., Fish. Bull. 66 : 65-130.

GRAHAM J.B., 1973. Heat exhange in the black skipjack and the blood-gas relationship of warm-bodied fishes. Proc. Nat. Acad. Sci., 70 (7) : 1964-1967.

GRAHAM J.B., 1975. Heat exchange in the yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, and skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis* and the adaptative significance of elevated body temperatures in scombrid fishes. Fish. Bull., 73 : 219-229.

GRAHAM J.B. and DIENER D.R., 1978. Comparative morphology of the central heat exchangers in the skipjack *Katsuwonus* and *Euthynnus*. In GD Sharp and AE DIZON, « The physiological ecology of tunas » : 113-1-345. Acad. Press. NY.

HOCHACHKA, P.W., W.C. HULBERT and M. HUPPY, 1978. The tuna power plant and furnace. In GD SHARP and AE DIZON (editors) « The physiological ecology of tunas » : 153-174. Acad. Press. NY.

KISHINOUYE K., 1923. Contributions to the comparative study of the so-called secombroid fishes. J Coll. Agric., Imp. Univ., Tokyo B : 293-475.

KONAGAYA S., K. YAMABE and K. AMANO, 1969 : on body temperature at the time of haulage. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 35 : 4 100-416.

LEVENEZ J.J., 1982. Note preliminaire sur l'operation senegalaise de « tracking » de listao. ICCAT, Col. Vol. of Sci. Pap., XVII (1) : 189-194.

MAGNUSON J.J., 1969. Digestion and food consumption by skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*). Trans. Amer. Fish. Soc., 98 (3) : 379-392.

NEILL W.H., J.J. MAGNUSON and G.G. CHIPMAN, 1972. Behavioral thermoregulation by fishes : a new exprimental approach. Science, 176 (4 042) : 1 443-1 445.

NEILL W.H. and S.D. STEVENS, 1974. Thermal inertia versus thermoregulation on « warm » turtle and tuna. Science, 184 : 1 008-1 010.

NEILL W.H., R.K.C. CHANG and A.E. DIZON, 1976. Magnitude and ecological implications of thermal inertia in skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis* (Linnaeus). Environ. Biol. Fish., 1 : 61-80.

SHARP G.D. and J. VLYMEN, 1978. The relation between heat generation, conservation and the swinning energetics of tunas. In GD SHARP and AE DIZON (editors) « The physiological ecology of tunas » : 213-232. Acad. Press. NY.

SHARP G.D., and S.W. PIRAGES, 1978. The distribution of red and white muscles, their biochemistry and the biochemical phylogeny of selected scombrid fishes. In GD SHARP and AE DIZON (editors) « The physiological ecology of tunas » : 41-78. Acad. Press. NY.

STEVENS E.D. and F.E. FRY, 1971. Brain and muscle temperatures ocean caught and captive skipjack tuna. Comp. Biochem Physiel. 38A : 203-211.

STEVENS E.D., H.M. LAM and I. KENDALL, 1974. Vascular anatomy of the countercurrent heat exchanger of skipjack tuna. Exp. biol., 61 : 145-153.

STEVENS E.D. and F.G. CAREY, 1981. One why of the warmth of warm-bodied fish. Am. J. Physiol., 240 (Regulatory Integrative Comp. Physiol. 9) : R151-R155.

WEBB P.W., 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. Fish. Res. Board. Can Bull., 190 : 158 p.

YONEMORI T., 1982. Study of tuna behavior particularly their swimming depths by use of sonic tags. Far seas Fish. Res. Lab. Newsletter, 44 : 1-5 (in Jap., trad. Angl. par Tamio Otsu, US Nat. Mar. Fish. Serv. Honolulu, n° 70).

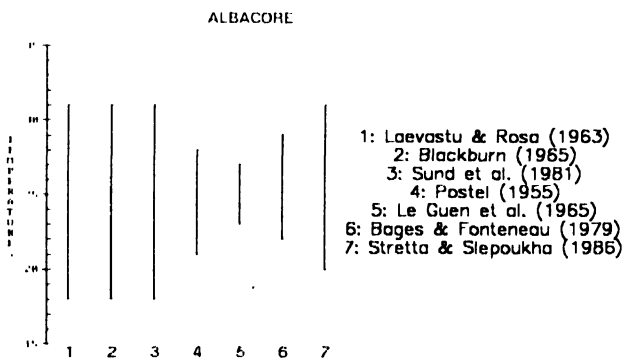
YUEN H.S., 1970. Behavior of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) as determined by tracking with ultra-sonic devices. J. Fish. Res. Bd. of Canada, 27 (11) : 2 071-2 079.

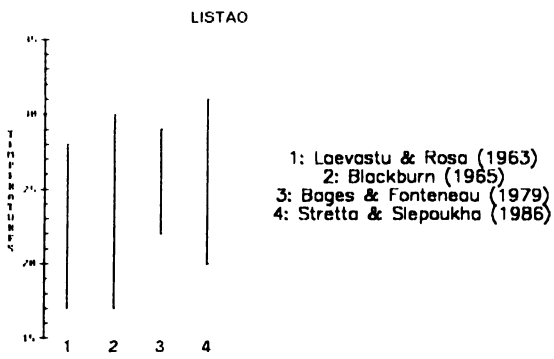
3.2 Relation capturabilité température de surface

par
Jean-Michel STRETTA et Michel PETIT
Oceanographes de l'ORSTOM
Centre ORSTOM
BP 5045
34032 MONTPELLIER Cedex
(France).

1. ALBACORE

Dans l'océan mondial, Laevastu et Rosa (1963), donnent comme limites de distribution pour cette espece, une fourchette thermique de 18° a 31°C avec un optimum thermique pour les pêches compris entre 21° et 24°C. Comme Blackburn (1965), nous emettons quelques reserves sur ces valeurs qui sont basées sur les positions moyennes des isothermes de surface correspondant aux limites des pêcheries de surface. De plus, cette fourchette thermique ne tient pas compte de la taille des poissons. Cependant,la plupart des auteurs





(Blackburn 1965, Nakamura 1969, Sund *et al.*, 1981) s'accordent pour fixer les temperatures limites pour l'albacore a 18° et 31°C, avec une abondance maximale entre 20° et 30°C (cf figure 1a). Toutefois, sa presence a ete signalee au large du Perou dans les eaux à 15°C (Bini, 1952). Par ailleurs, les albacores pêchés a la palangre évoluent en profondeur dans des eaux dont les temperatures sont comprises entre 15 et 20°C.

2. LISTAO

Les auteurs qui ont analyse les limites thermiques de cette espece s'accordent à reconnaitre qu'elles varient en fonction de la taille du poisson et de la région où il est pêche. Laevastu et Rosa (1963) fixent pour le listao au niveau mondial (avec la même methode que pour l'albacore), un intervalle thermique de 17° à 28°C avec un optimum pour les pêches compris entre 20° et 22°C. Depuis, differents auteurs (Broahead et Barret 1964, Blackburn 1965, Nakamura 1969, William 1970, Evens *et al.* 1981) ont defini, en utilisant des donnees thermiques concomitantes aux pêches de listao, un intervalle de temperature compris entre 17° et 30°C pour la presence du listao et de 20° à 29°C pour son abondance (cf figure 1b). Dans les eaux australiennes, Robins (1952) donne comme limite inférieure pour cette espèce une température de 15°C. Non loin de la, dans les eaux de la Nouvelle-Zelande, Eggleston et Paul (1978) font état de faibles captures de listaos entre 16° et 18°C et de fortes captures entre 19° et 21°C pendant l'ête 1976-1977.

3. PATUDO

Pour le patudo, Laevastu et Rosa (1965) fixent, au niveau mondial, un intervalle thermique compris entre 11° et 28°C, avec une gamme de temperatures où se situent les pêches entre 18° et 22°C. Sund *et al.* (1981), precisent que les temperatures les plus elevées correspondent aux pêcheries de surface, alors que les temperatures les plus froides correspondent aux pêches palangrières.

4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bini G. (1952). Osservazioni sulla fauna marina delle coste del Cile e del Peru con speciale riguardo alle specie ittiche in generale ed i tonni in particolare. Bull. Pesca Piscic. Idrobiol., 7 (1) : 11-60.

Bages et A. Fonteneau (1979). Prises de la flottille thonière franco-ivoiro-senégalaise et temperature de surface en 1977. Int. Comm. Conserv. Atlantic Tunas (SCRS 1979) Sci. Pap. 7 (1) : 180-198.

Blackburn M. (1965). Oceanography and the ecology of tunas. Oceanogr. Mar. Bull. Ann. Rev., 3, 299-322.

Broahead G.C. and I. Barret (1964). Some factors affecting the distibution and apparent abundance of yellowfin and shipjack tuna in the Eastern Pacific ocean. Bull. Inter. Amer. Trop. Tuna Commn., vol 8 : 417-473.

Eggleston et Paul (1978). Satellites, sea temperature and skipjack. *In* G.V. Habib and P.E. Roberts (Compilators). Proceeding of the Pelagic Fisheries Conference, July 1977 : 75-84. New Zealand. Minis. Agric; Fish. Res. Div., Occas. Publ. 15.

Evans R.H., D.R. Maclain and R.A. Bauer (1981). Atlantic skipjack tuna; influences of the environment on their vulnerability to surface gear. Inter. Comm. Conserv. Atlantic Tunas Sci. Pap. 9 (1) : 264-274.

Laevastu T. and H. Rosa (1963). Distribution and relative abundance of tunas in relation to their environment. FAO Fish. Rep. 6 (3) : 1835-1851.

Le Guen J.C., F. Poinsard et J.P. Troadec (1965). La pêche de l'albacore (*Neothunnus albacares*, Bonnaterre) dans la zone orientale de l'Atlantique intertropical. Etude preliminaire. Doc. Scient. Centre ORSTOM. Pointe-Noire. S.R. n° 263 : 27 pp.

Nakamura H. (1969). Tuna distribution and migration. Fishery News (Books) Ltd., London, 76 pp.

Postel E. (1955). Recherches sur l'ecologie du thon a nageoires jaunes, *Neothunnus albacora* (Lowe), dans l'Atlantique tropico-oriental. Bull. Inst. Franç. Afr. Noire, Ser. A, 17 : 279, 318.

Robins J.P. (1952). Further observations on the distribution of striped tuna *Katsuwonus pelamis* L., in eastern australian waters, and its relation to surface temperature. Aus. J. mar. freshwat. Res., 3 : 101-110.

Stretta J.-M. et M. Slepoukha (1986). Analyse des facteurs biotiques et abiotiques associes aux bancs de listaos, pp 161-169. In Proceedings of the ICCAT Conference on the International Skipjack Program. (P.E.K. Symons, P.M. Miyake and G.T. Sakagawa Editors) ICCAT 388 pp.

Sund P.N., M. Blackburn and F. Williams (1981). Tunas and their environment in the Pacific ocean : a review. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 19, 443-512.

William F. (1970). Sea surface temperature and the distribution an apparent distribution of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in the eastern Pacific ocean, 1951-1968. Inter-Am. Trop. Tuna Comm. Bull. 15 : 229-281.

4. Télédétection satellitaire de l'environnement des pêcheries : les outils et le traitement de données

4.1 Les satellites météorologiques

par Bernard GUILLOT
Antenne ORSTOM
Centre de météorologie spatiale de Lannion

Caractéristiques générales des satellites météorologiques

Le recours aux satellites pour les besoins de la meteorologie commence avec les débuts de l'ere spatiale, et le premier vaisseau opérationnel, TIROS 1, a ete mis en place il y a déjà 28 ans, le 1er avril 1960; il inaugurait une longue série d'engins qui ont assuré, depuis cette époque, un service continu.

Des les origines egalement la creation de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), par exemple, montre que les initiateurs des programmes avaient d'autres objectifs que meteorologiques; en realite, la multiplicite des services que l'on peut en attendre fait aujourd'hui de ces satellites un complement indispensable des satellites d'observation de la terre (du type landsat ou spot), pour l'etude de l'environnement terrestre.

Les caractéristiques essentielles des images qu'ils fournissent sont la repetitivité, et la grande extension spatiale des mesures. Les instruments qu'ils ont a bord sont en effet conçus pour que l'ensemble du globe terrestre soit surveille de façon continue; c'est aussi pour cette raison que l'on a mis en place, au niveau mondial, une repartition des tâches, qui a conduit a créer deux types de vaisseaux spatiaux operationnels, les satellites à défilement, et les satellites geostationnaires.

3.1. LES SATELLITES A DEFILEMENT

3.1.1. Histoire du programme

Nous décrivons ici brièvement les satellites de la serie americaine Tiros, car ils presentent un certain nombre d'avantages, qui en font des instruments utilisables, à relativement peu de frais, à de multiples missions.

Les satellites en place actuellement, NOAA 9 et NOAA 10, sont les héritiers des premiers Tiros, Itos ou NOAA, et ils ont bénéficie, pour leur mise au point, des experiences faites sur la série Nimbus, dont le dernier representant est le satellite Nimbus 7, lancé en 1978.

On peut suivre l'histoire de ces developpements sur le tableau 1 : « Satellites météorologiques de la serie Tiros, NOAA ». On peut y voir :

— le caractere operationnel de la série; prise de vue continue depuis 1960;

— les progres dans la série; les premiers satellites n'etaient pas héliosynchrones; avec la serie Itos commencent les transmissions automatiques d'images (transmission APT). Les caméras vidicon disparaissent apres Itos 2 de la serie ITOS-NOAA, qui inaugure au même moment le radiomètre VHRR (radiomètre a très haute résolution); les satellites actuels sont munis d'un radiometre encore plus performant, Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR, à 4 puis 5 canaux, prevu pour permettre une correction de l'absorption atmospherique;

— que la serie expérimentale Nimbus évolue en parallèle des série operationnelles, pour lesquelles elle sert de banc d'essai; le radiomètre infra-rouge a été utilisé pour la première fois sur Nimbus 1 avant d'équiper la serie Itos; de la même maniere, il est envisagé d'employer, sur les futurs satellites Tiros, le radiometre CZCS (Coastal Zone Colour Scanner), dont Nimbus 7 est aujourd'hui equipe, qui a ete mis au point pour etudier les zones côtieres, la couleur de l'eau, la pollution, les glaces, etc...

3.1.2. Les satellites actuels

L'originalité de la série actuelle tient au fait qu'il s'agit de deux satellites couplés, programmes pour une duree de vie de deux ans, et dont le remplacement est assuré à dates régulières. Le satellite experimental Tiros N a été lancé le 13 octobre 1978; il a cesse d'être utilise depuis le 1er novembre 1980. Actuellement, fonctionnent NOAA 9, lancé le 12-8-1984, et qui fut rejoint par NOAA 10 le 17-9-1986.

TABLEAU 1

SATELLITES METEOROLOGIQUES DE LA SERIE TIROS/NOAA (renseignements obtenus à la station de Lannion, notamment aupres de J. Hamon et G. Rochard)

Tiros : television Infra-Red Observation Satellite
Noaa : National Oceanic and Atmospheric Administration

6.1.1. Satellites de la serie Tiros

Tiros	1	01.04.1960		
	2	23.11.1960		
	3	12.07.1961		Stabilisation par spin.
	4	8.02.1962	Transmission	130-140 kg, 48 × 107 cm;
	5	19.06.1962	d'images	Orientation fixe dans
	6	18.09.1962	differes	l'espace;
	7	19.06.1963		non héliosynchrones
	8	21.12.1963		
	9	22.01.1965		
	10	02.07.1965		

6.1.2. Satellites Itos : Improved Tiros Operational Satellites

Essa	1	03.02.1966	
	2	28.02.1966	
	3	02.10.1966	Satellites pour l'etude
	4	26.01.1967	de l'environnement
	5	20.04.1967	Images de jour exclusivement
	6	10.11.1967	Transmission Apt
	7	10.08.1968	
	8	15.12.1968	Fonctionnent encore en 1974 (essa-8)
	9	26.02.1969	Archives à Lannion jusqu'en nov. 1974

6.1.3. Serie experimentale Nimbus. Satellites heliosynchrones

Nimbus	1	A	28.08.1964	DRIR (Infrarouge direct de nuit, en plus de l'APT de jour)
	2	B	15.05.1966	
	3	C	14.04.1969	
	4	D	08.04.1970	1083-1097 km, 400 kg
	5	E	11.12.1972	
	6	F	12.06.1975	1100 km, 870 kg
	7	G	21.10.1978	954 km, incline a 99°

6.1.4. Serie Itos-Noaa

Itos	1 ou Tiros-M	23.01.70	1433-1479 km; 310 kg, 101, 99°, 115°
	2/A ou Noaa-1	11.12.70	1440 km
	B	21.10.71	retombe au large de l'ile Devon apres 90 min.
	C	fev. 72	pas lance (fusee defectueuse), reporte
	D ou Noaa-2	15.10.72	344 kg
	E	Juil. 73	echec (tombe)
	F ou Noaa-3	06.11.73	340 kg, 1500 km
	G ou Noaa-4	15.11.74	330 kg, 1450 km, 102°
	H ou Noaa-5	29.07.76	

Itos 1 et 2 etaient différents des Itos D et H, par la presence d'un melange radiomètres infrarouges/caméras Vidicon, et par l'absence de VHRR-VTPR.

6.1.5. Serie Tiros-N Noaa A-G

Tiros	N	13.10.1979	Prototype. Les donnees HRPT et APT ne sont plus transmises depuis le 01.11.80
Noaa	A/6	27.06.1979	Premier satellite opérationnel, 4 canaux
	B	29.05.1980	Echec
	C/7		Lance le 23.06.1981, arrêt en janvier 1985; 5 canaux
	D	mai 1981	non lance
	E/8	28/03/83	jusqu'a janvier 1986; 4 canaux
	F/9	12/12/1984	operationnel au 19/11/1987; 5 canaux
	G/10	17/03/1986	opérationnel au 19/11/1987; 4 canaux

Ce sont des satellites héliosynchrones, placés sur des orbites quasi polaires, de telle sorte que le satellite « du matin » (NOAA 10) franchisse l'Equateur à 07h30 solaire, en orbite descendante, et le satellite « de l'après-midi » (NOAA 9) à 15h00 solaire, en orbite ascendante, si bien que, dans les plus mauvaises conditions (aux basses latitudes), le même point de la surface terrestre soit vu au moins 4 fois par jour, a six heures d'intervalle.

Ils parcourent un peu plus de 14 orbites par jour, avec un décalage de 25° de longitude à chaque passage; leur champ de vue (trace de l'orbite) est de 2 800 km environ; un satellite qui passe au-dessus d'une antenne (de l'horizon à l'horizon) reste dans le champ de vue pendant 16 minutes; une station de réception peut capter les données dans une aire circulaire de 6 200 km de diamètre (elevation 0°), ou de 5 200 km (élévation 5°).

3.1.3. Les instruments des satellites; le radiomètre à très haute résolution (AVHRR)

Les satellites NOAA possèdent plusieurs instruments :

- la sonde infra-rouge à haute resolution (HIRS) (fig. 1) mesure le rayonnement infra-rouge (19 canaux) et visible (1 canal); la résolution géométrique (17 km au sous-point) est faible; cet instrument pourrait être utilisé pour des corrections atmosphériques des mesures plus perfectionnées realisées par d'autres systemes (Meteosat, expérience en cours). Il a actuellement un usage specifiquement météorologique;
- le dispositif de sondage stratospherique (Stratospheric Sounder Unit, SSU) fournit des données sur la température de la stratosphere;
- l'unite de sondage micro-ondes (Microwave Sounder Unit, MSU) est héritée de Nimbus 6; elle mesure le rayonnement dans la bande de l'oxygene et peut, entre autres, servir à determiner la température de l'eau sous les nuages (résolution 109 km au sous-point);
- le radiomètre à très haute resolution (AVHRR);
- le systeme de collecte de donnees (DCS), conçu par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) français, pour recevoir les donnees fournies par le système Argos;
- l'enregistreur de l'environnement spatial (Space Environment Monitor, SEM).

L'instrument le plus intéressant pour l'étude des phenomènes terrestres est le Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), qui mérite une étude detaillee.

Les auteurs des programmes spatiaux Tiros déclarent eux-mêmes qu'il a été conçu pour fournir des données utilisables en océanographie et en hydrologie, et pour l'étude de la neige et des glaces. Etant donné la qualité des données, il est évident qu'il peut rendre encore bien d'autres services.

Le tableau 2 : canaux du radiomètre AVHRR, donne le détail des mesures qu'il effectue, suivant le numéro des satellites dans la série; NOAA 10 a quatre canaux, et NOAA 9, cinq canaux. Le canal 1 enregistre le rayonnement dans une fenêtre assez étroite (0,58 - 0,68 µm); le spectre du canal 2 (proche infra-rouge) est

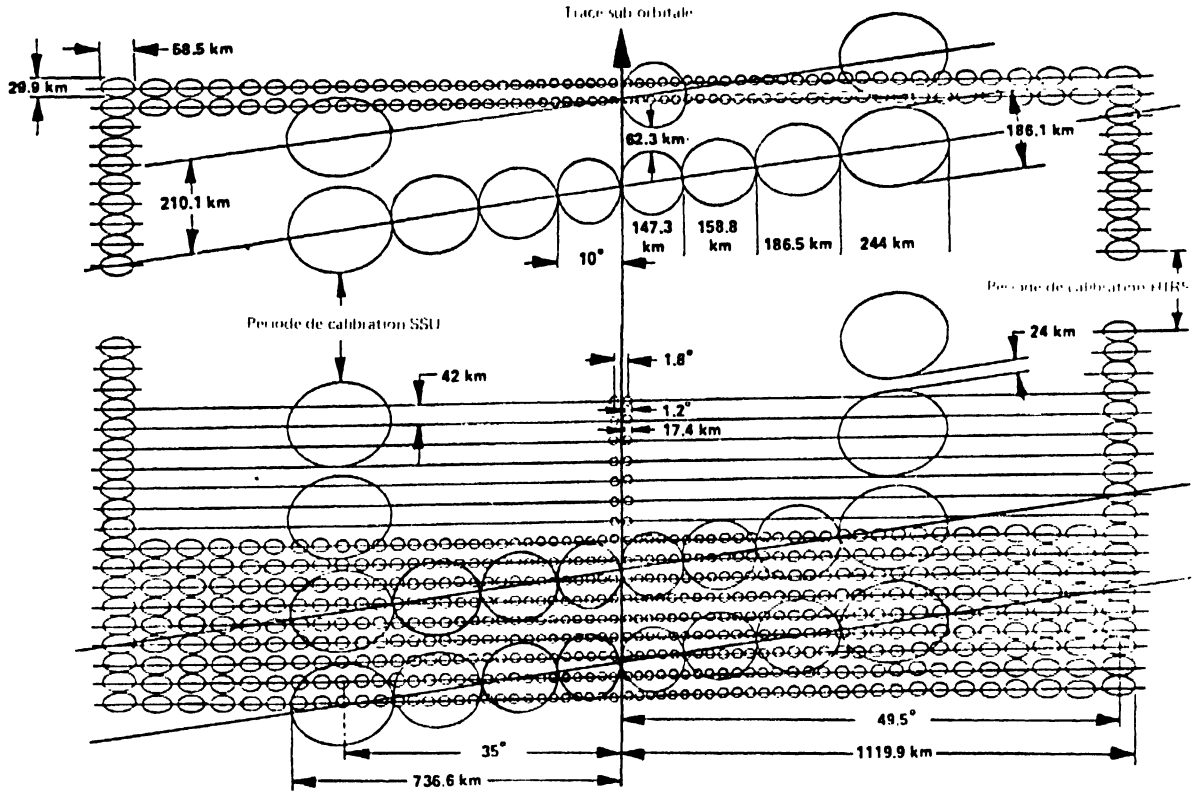


Fig. 1. Projection au sol des zones balayées par la sonde infra-rouge à haute résolution HIRS/2 et par le dispositif de sondage stratosphérique (Schwalb, 1978, fig. 10)

plus large (0,725 - 1,0 µm). Le canal 3 utilise la fenêtre à 3,7 µm; de nuit, il enregistre la température au sol (rayonnement émis par la terre), et de jour le même rayonnement, plus une part, non négligeable, d'énergie solaire réfléchie; enfin, les canaux 4 et 5 captent, de jour comme de nuit, le rayonnement émis par la terre. Les canaux 3, 4 et 5 peuvent être utilisés, suivant diverses combinaisons, pour distinguer, dans les signaux reçus, la part prise par l'absorption atmosphérique dans l'émissivité de la terre.

3.1.4. Composition, forme et dimension des images AVHRR

Le module du radiomètre comprend :

- un dispositif de balayage, avec un moteur, et un miroir éclairant le champ de vue du télescope; le miroir tourne à 360 tours par minute, et réalise donc six lignes de balayage (ou lignes images) par seconde;
- un système optique secondaire sépare l'énergie en bandes spectrales discrètes, correspondant aux canaux du radiomètre.

Les données ainsi détectées sont chiffrées sur un processeur de bord, mises en mémoire, et lues à la cadence appropriée pour la transmission au sol.

Les canaux visibles et proche infra-rouge utilisent des détecteurs au silicon pour mesurer la radiation incidente; 99 % de cette énergie passe par eux, et le bruit est de 0,5 % albédo; les détecteurs infra-rouge sont refroidis à 105°K, avec un niveau de bruit inférieur à 0,12° K.

Chaque image AVHRR est donc constituée d'une succession de lignes, composées de points juxtaposés, et elle est construite de façon continue, par les mouvements combinés du satellite et du radiomètre; les intervalles fixes, entre les lignes, sont utilisés pour calibrer les instruments; le miroir explore en effet successivement la terre, de l'horizon à l'horizon, l'espace, l'intérieur du satellite, le vide, et la terre à nouveau le tour suivant.

Tableau 2 : canaux du radiomètre AVHRR

Instruments	Canaux spectraux (µm)					Vaisseau spatial
	1	2	3	4	5	
AVHRR 1 prototype	0,55-0,90	0,725-1,0	3,55-3,93	10,5-11,5	–	Tiros-N
AVHRR 1 série	0,58-0,68	0,725-1,0	3,55-3,93	10,5-11,5	–	Noaa 6, 8 et 10
Avhrr 2 prototype	0,58-0,68	0,725-1,0	3,55-3,93	10,3-11,3	11,5-12,5	Noaa 7
Avhrr 2 série	0,58-0,68	0,725-1,0	3,55-3,93	10,3-11,3	11,5-12,5	Noaa 9

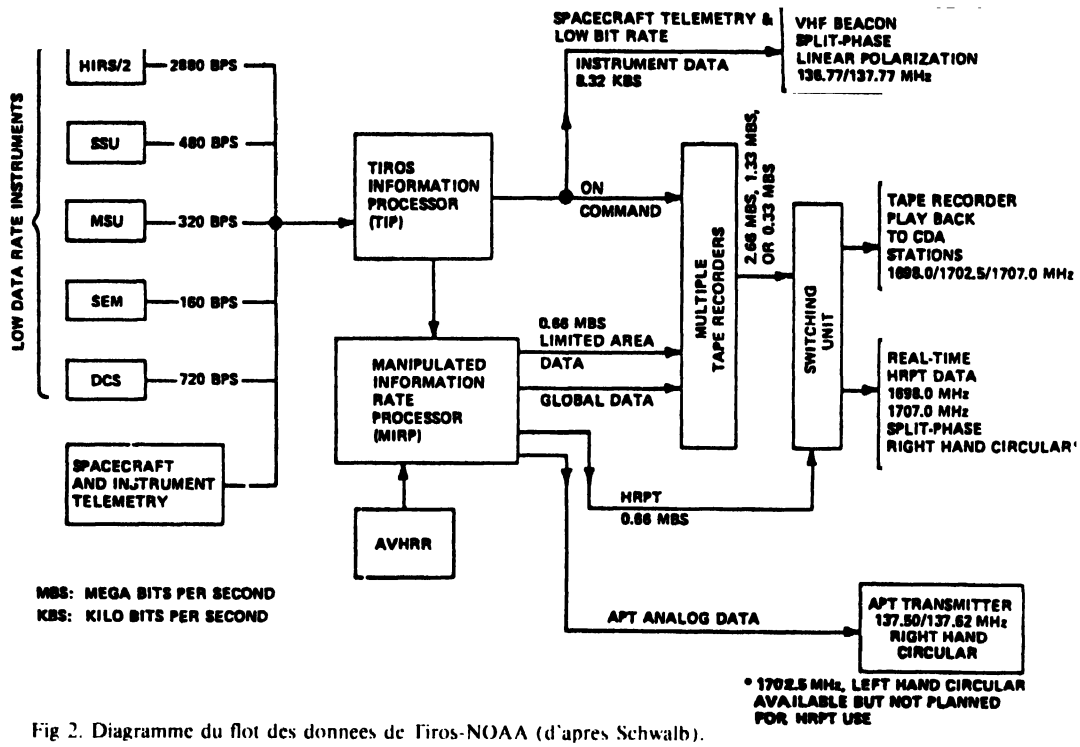


Fig 2. Diagramme du flot des donnees de Tiros-NOAA (d'apres Schwalb).

L'altitude du satellite determine le champ du balayage, qui comporte 2048 points; compte tenu de la résolution (1,1 km au point sous-satellite) et de la déformation subie par l'image à l'horizon, la largeur de l'image ainsi définie est de 2 800 km (1 400 km de part et d'autre du passage). La longueur de l'image varie avec la duree de la réception, qui dépend de la position de la station par rapport a l'orbite considérée; dans le meilleur des cas le champ de poursuite est de 16 minutes environ, soit 5760 lignes, et une longueur de 6 300 km environ (57° de latitude). Une image de ce type comporte 12 millions de points et 60 millions de chiffres, pour les cinq canaux.

Les mesures sont effectuées avec une tres grande précision, une tres haute resolution radiométrique; elles sont en effet chiffrées sur 10 bits et se trouvent ainsi réparties sur 1 024 valeurs. Les températures sont enregistrées au 1/8 de degre près, et les rayonnements visible et proche infra-rouge en 1 024 valeurs d'albedo. Ce haut niveau de précision, et la bonne calibration du radiomètre, expliquent la qualité des images ainsi obtenues.

3.1.5. La transmission des données AVHRR

Le système de transmission des données AVHRR (figure 2 : diagramme de données émises par les satellites Tiros-NOAA) livre deux sortes de produits :

- les transmissions APT (Automatic Picture Transmission) émettent des données AVHRR réduites; elles concernent deux canaux sur cinq, choisis sur commande, avec une résolution géométrique ramenée à 4 km, et une transmission en mode analogique. Ces données sont destinées en priorité à la météorologie; les stations d'acquisition sont peu coûteuses, et il en existe un peu partout a la surface du globe (figure 3 « station APT equipées de materiel français »);
- la transmission des données à haute resolution (High Resolution Picture Transmission, HRPT) se fait par un signal a haute cadence, a raison de 66 540 mots de 10 bits par seconde; elle comprend les données AVHRR et celles des sondes a bas taux d'acquisition; les stations d'aquisition sont beaucoup plus cheres et necessitent en aval un important dispositif de gestion et de traitement des donnees; il en existe quelques unes (station de Mas Palomas : Canaries, agence spaciale européenne; de Sao Jose Dos Campos, Brésil) dans les limites de la ceinture intertropicale.

En outre les memoires de bord du satellite enregistrent des donnees pour une transmission ulterieure aux centres de traitement de la NOAA. Cinq memoires d'une capacité de $4,5 \times 10^8$ bits permettent de stocker :

– 1 orbite complete (110 minutes) de donnees globales réduites (GAC);

– 10 minutes de données a haute résolution (HRPT = donnees LAC);

– 250 minutes de donnees à basse cadence d'acquisition (données TIP).

Les donnees AVHRR LAC (Local Area Coverage) sont enregistrées hors du champ des stations de réception, pour servir à des études. La NOAA effectue ce service à la demande, pour des institutions de recherche nationales ou étrangères.

Les données globales réduites (Global Area Coverage, GAC) ont été conçues pour permettre à la mémoire du satellite de conserver un échantillonnage de données AVHRR d'une orbite complète (110 mn). Pour cela, le calculateur de bord sélectionne une ligne sur

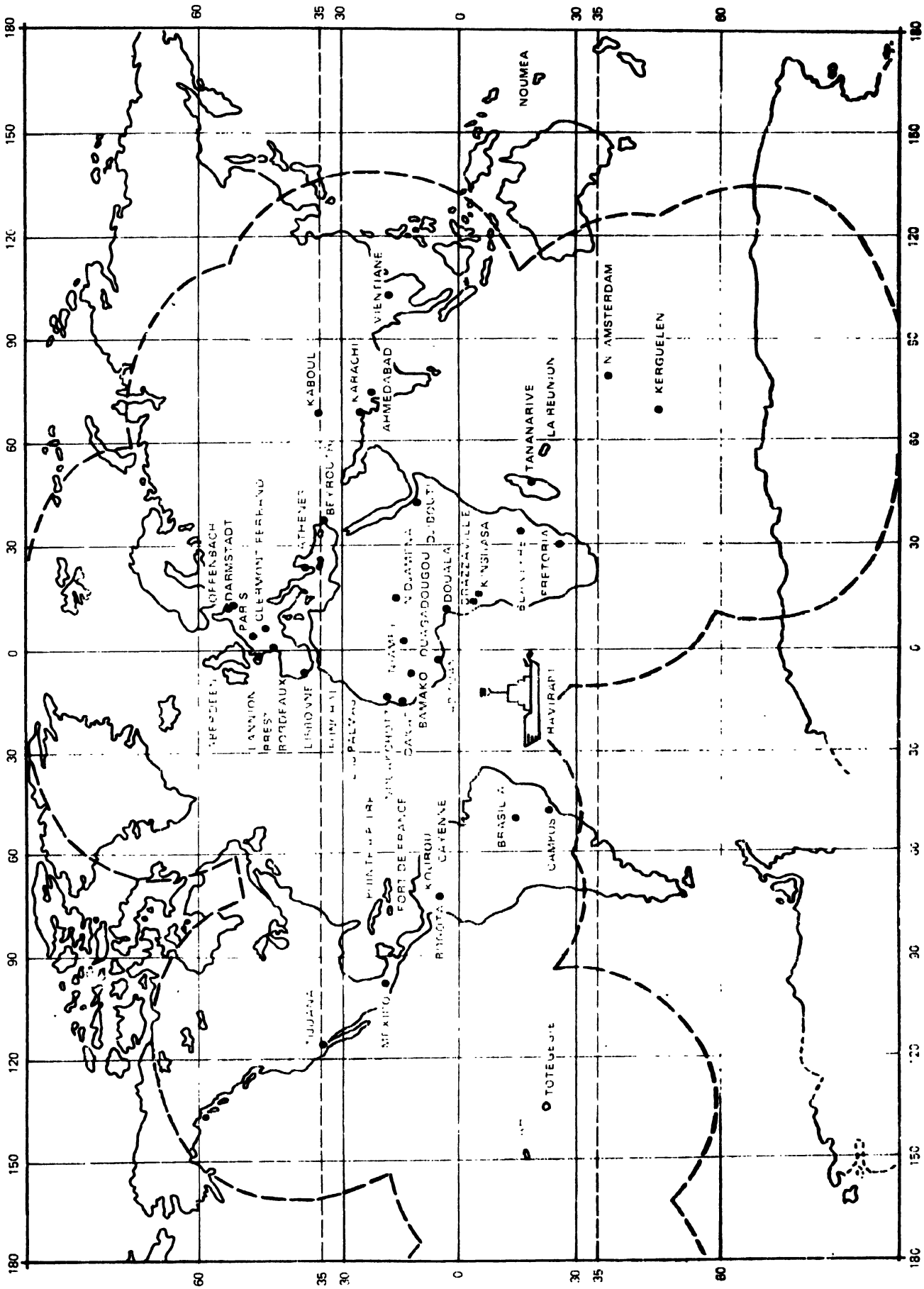
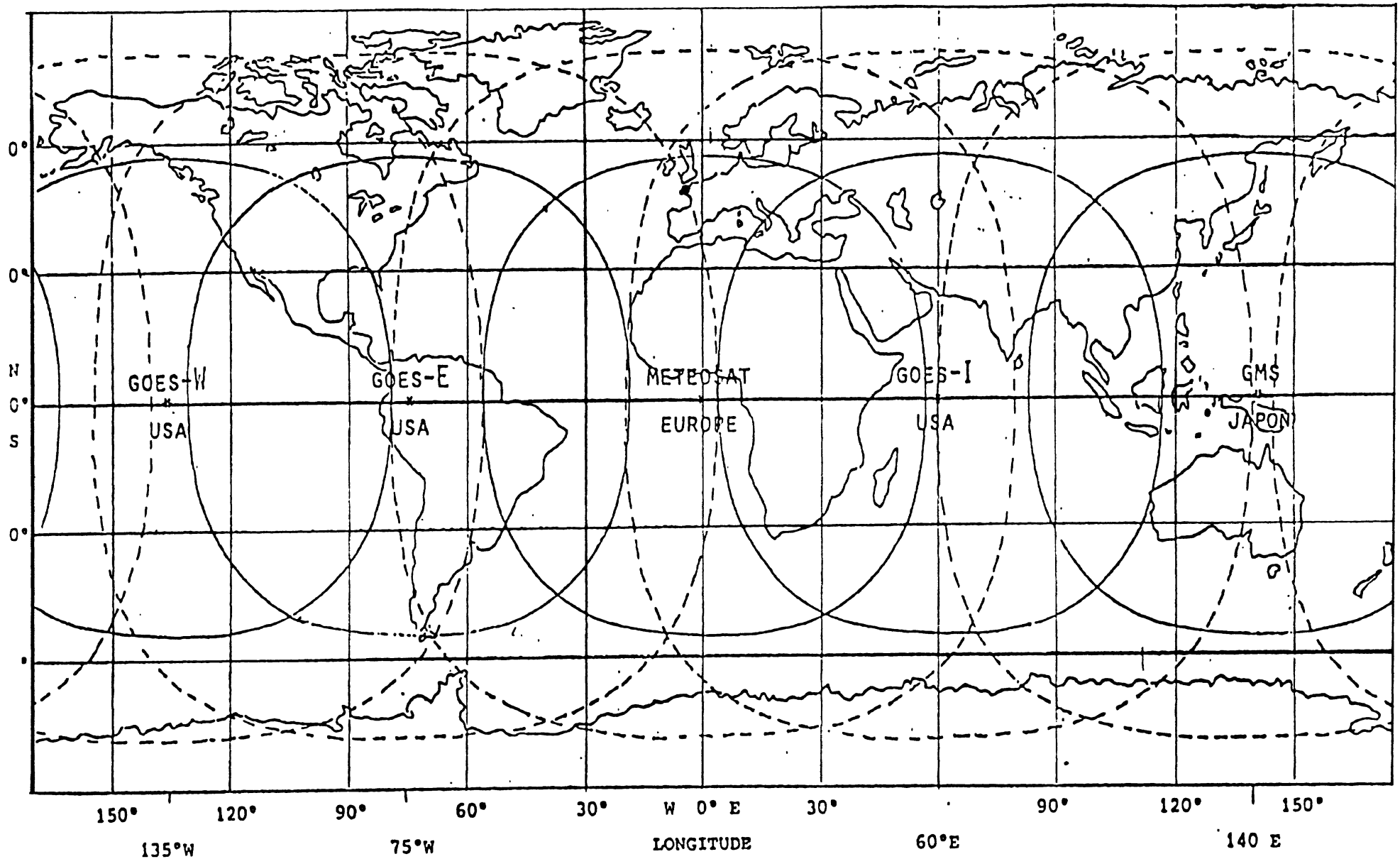


Fig 3. Stations APT equipees de materiel français (fourni par J. Hamon).



mite des communications rad Cham

mite des images

trois, et fabrique un point sur les lignes, en faisant la moyenne des valeurs radiométriques de quatre points sucessifs, le cinquième point suivant étant sauté. Chaque ligne GAC ainsi constituée contient 409 points, et le nombre total de points de l'enregistrement AVHRR se trouve divisé par 15. La résolution est réduite à 4 km au point sub-satellite. Ces données servent, entre autres, à la constitution de cartes de temperature de surface de la mer (cartes GOSSTCOMP).

On peut noter, pour finir, que ces satellites émettent constamment des données, et qu'il suffit de se mettre à l'écoute pour les obtenir.

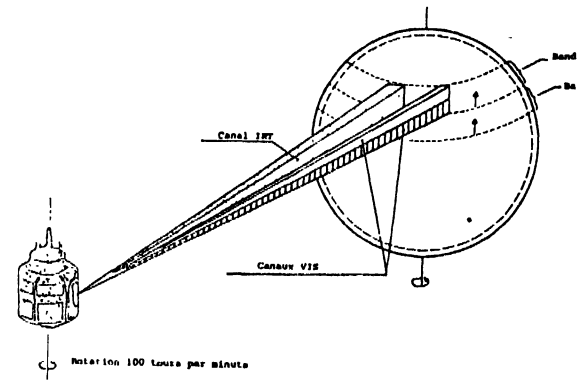


Fig. 5. Representation schematique des champs instantanes de vue du radiometre.

3.2. Les satellites géostationnaires

3.2.1. Généralités

Ces satellites sont complémentaires des precedents, car ils observent en priorité les basses latitudes; ils sont mis en place suivant un programme d'observation météorologique, à des emplacements convenus, dans le but d'obtenir des données, au même moment, de l'ensemble du globe (fig. 4 : champ d'observation des satellites geostationnaires). Conçu pour être opérationnel, ce programme a subi d'importants retards; actuellement, les cinq sites prévus sont occupes :

- les sites a 75° W (GOES-EST), et a 135°W (GOES-WEST), sont occupes depuis plusieurs années de façon opérationnelle, par les satellites des séries américaines SMS (Synchronous Meteorological Satellite) et GOES (Geostationnary Operational Environmental Satellite);
- à 0° l'Agence spatiale europeenne (ASE) a successivement mis en place Meteosat 1, Météosat 2, et Météosat P2;
- le Japon a placé, à 140° Est, GMS 1 et GMS 2;
- un satellite americain (GOES 3) a été place en 1979 à 60° Est, pendant l'annee du GARP (Global Atmosphere Research Programme); ensuite, le site a été inoccupé, mais ce vide a été comblé par un satellite indien (INSAT) en août 1983, dont les informations ne peuvent être reçues qu'à la station de Hyderabad.

On peut regretter un manque de coordination entre les programmes, qu'ils soient Americain, Europeen, Indien ou Japonais; les resolutions géométriques varient de l'un à l'autre d'un km au sous-point (SMS et GOES) à 1,5 km (GMS) et 2,5 km (Météosat) pour les canaux visibles; de 8 × 4 km (SMS, GOES) à 5 km (GMS et Météosat) dans l'infra-rouge.

Ces satellites sont placés à environ 36 000 km de la surface de la terre, sur des orbites presques circulaires situées dans le plan de l'Equateur; ils parcourent, dans le sens de rotation de la terre, une orbite complète en 24 heures, et ils apparaissent donc comme immobiles par rapport à la terre; ils « voient » la terre à l'interieur d'un cône de 17° d'angle au sommet, et le système de projection qui en découle donne des images de plus en plus déformées lorsque l'on se déplace du point sous satellite vers l'horizon. Chaque satellite prend une image toutes les 1/2 heures du globe terrestre.

3.2.2. Le satellite Météosat

Il comporte trois canaux différents :

- le canal visible (VIS) mesure l'énergie solaire réfléchie, entre 0,4 et 1,1 µm;
- le canal vapeur d'eau (VDE) capte le rayonnement émis par la couche la plus haute de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphere (longueur d'onde comprise entre 5,7 et 7,1 µm);
- le canal infra-rouge thermique (IRT) enregistre l'energie émise par la surface terrestre, entre 10 et 12,5 µm.

Les images sont constituees de pixels de 5 km de côte (infra-rouge et vapeur d'eau), et de 2,5 km (visible) au point sous satellite; le canal visible est constitué de deux recepteurs évoluant en parallèle (fig. 5 : representation schématique des champs instantanes de vue du radiomètre). Les images comprennent 5 000 lignes de 5 000 points (vis), ou 2 500 lignes de 2 500 points (infra-rouge et vapeur d'eau).

Les donnees sont transmises en permanence au sol; elles sont reçues à la station de Darmstadt (RFA), gérée par l'Agence Spatiale Européenne, qui effectue des traitements avant dissemination; la station du Centre de Météorologie Spatiale de Lannion (CMS) reçoit a son tour ces donnée disséminées.

3.2.3. Le satellite GOES EST

Composante orientale du programme américain, ce site se trouve à 75°W, presque à l'aplomb du point frontière triple séparant la Colombie, le Pérou et l'Equateur, entre les rios Caqueta et Putumayo. Cette situation en fait un observatoire privilégié pour le continent sud-américain dans son ensemble.

Plusieurs satellites se sont succédés à cet emplacement, assurant un service continu, de 1974 à 1984. Le premier, SMS 1, fut lancé le 17 mai 1974; il fut ensuite relayé par les GOES, par SMS 2, et, depuis 1981, par GOES 5 (1). Les images sont reçues à Lannion depuis les origines; la station a conservé jusqu'au 1-1-1986 une série continue d'archives photographiques, sur films à très grande précision, impressionnés à l'aide du Vizir, instrument qui transforme les données numériques en

64 niveaux de gris. Le radiomètre SMS ou GOES prend toutes les 1/2 heures des images du globe dans deux canaux :

- un canal infra-rouge « thermique » (10,5-12,5 µm), dont la résolution géométrique, au point sous satellite, est de 8 × 4 km (points rectangulaires de 8 km de long dans les lignes, et de 4 km de large le long de la ligne);
- un canal « visible », qui capte le rayonnement dans un spectre relativement étroit (0,55-0,75 µm), dont la résolution radiométrique est faible (valeurs d'albédo réparties en 64 comptes), mais dont la résolution géométrique est exceptionnelle à ce niveau (un kilomètre au sous point). Ce canal visible est en fait constitué de huit récepteurs disposés en parallèle; ceci introduit une certaine disparité dans les données, car aucun de ces récepteurs n'a la même courbe de sensibilité, d'où la création d'un lignage assez marqué sur les images.

La station de Lannion reçoit toutes les six heures (0 h, 6 h 00, 12 h 00, 18 h 00) une image IR et VIS, qui est reformatée et réémise ensuite sur Météosat, à l'attention des usagers de ce satellite. Cette fonction « relais » est assurée pour le compte de l'Agence Spatiale Européenne.

3.2.4. Champ d'application des données

Les satellites géostationnaires utilisés avec des méthodes appropriées constituent de précieux observatoires pour de nombreuses applications autres que météorologiques. En climatologie, ils rendent possible la constitution de cartes d'ensoleillement (ou de nebulosité), de vents, des zones convectives, des déplacements saisonniers des grandes cellules atmosphériques, etc; en océanographie, ils peuvent être utilisés pour la cartographie des masses d'eau, des fronts thermiques et à des opérations d'aide à la pêche; en hydrologie, ils devraient rendre de très appréciable services de prévision et de surveillance des variations saisonnières des zones d'inondation et des crues des grands fleuves, des lacs temporaires, et même, avec l'aide des mesures au sol, d'estimation des débits; en agrométéorologie, les données thermiques, et visible (étude du gisement solaire à échelle fine, par exemple) devraient beaucoup faire progresser la connaissance du milieu physique.

3.2.5. Calibration des satellites

Dans le cadre du projet ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project), il a été prévu une collecte de données des satellites, et leur intercalibration. les centres de traitement de secteur (SPC), affectés à chacun des satellites, envoient au centre d'étalonnage (SCC : Satellite Calibration Center) de Lannion des portions d'images sélectionnées. Le centre d'étalonnage est chargé de calculer les paramètres de normalisation intersatellites, par rapport à un étalon qui est constitué par des images, prises au même moment, par les satellites à défilement NOAA. Ces renseignements sont ensuite exploités par le centre mondial de traitement (GPC : Global Processing Center), pour produire un ensemble de radiances normalisées et étalonnées.

En ce qui concerne Météosat, les formats disséminés par l'Agence Spatiale Européenne contiennent des paramètres de calibration, qui permettent un étalonnage satisfaisant des données infra-rouge.

---

(1) La série a été interrompue du 29 juillet 1984 au 25 mars 1987, date de l'entrée en fonctions de GOES 7.

4.2 Mesure satellitaire de la couleur de la mer : l'expérience CZCS

par H. DEMARCQ*

* Océanographe de l'ORSTOM, Centre de Recherches Océanographiques de Dakar Thiaroye, BP 2241, Dakar (Sénegal)

1. CARACTERISTIQUES DU SATELLITE ET DU CAPTEUR

Le capteur multispectral CZCS (Coastal Zone Color Scanner) a été embarqué sur le satellite NIMBUS-7. Ce dernier a été lancé en 1978 et est resté opérationnel jusqu'en 1986. Le capteur CZCS possède six canaux dont quatre dans le domaine visible, un dans le proche infra-rouge et un dans l'ifrarouge moyen (voir tableau 1). Les principales caractéristiques du satellite sont :

- orbite : héliosynchrone
- altitude d'observation : 955 km
- champ instantanné : 0.0495 degré
- largeur du pixel au nadir : 825 m
- nombre de pixels par ligne : 1968
- largeur du champ balayé : 79 degrés, soit 1 566 km

Le capteur possède en outre la particularité de pouvoir incliner le plan de balayage jusqu'à 20 degrés de la verticale dans le sens de la marche afin d'éviter la réflection spéculaire du soleil. Cet angle d'inclinaison est appelé le *tilt* du capteur.

Tableau 1 : caractéristiques des 6 canaux CZCS

2. TRAITEMENT DES DONNEES CZCS

2.1 Caractéristiques du signal mesuré

Le signal mesuré par le capteur dans le domaine visible est un luminance spectrale. Cette dernière s'exprime en $\mu W.cm^2.str^{-1}.nm^{-1}$. Elle est notée L_λ et représente la partie du rayonnement solaire réfléchi montant vers le capteur pour la bande spectrale considérée.

2.1 Calibration des données et correction de dérive

Le signal électrique est numérisé à bord du satellite et codé en comptes numériques (CN) sur 8 bits, de 0 à 255, avant d'être retransmis à la station de réception avec les paramètres orbitaux. Les comptes sont transformés en luminances spectrales (L_λ) par une relation linéaire de calibration établie pour chaque canal du capteur avant le lancement, de la forme :

$$L_\lambda = CN_\lambda * S_\lambda * F_\lambda + I_\lambda$$

S_λ et I_λ sont la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de calibration. F_λ est un terme de correction supplémentaire estimé ultérieurement prenant en compte une décroissance progressive de sensibilité du capteur pour chaque canal.

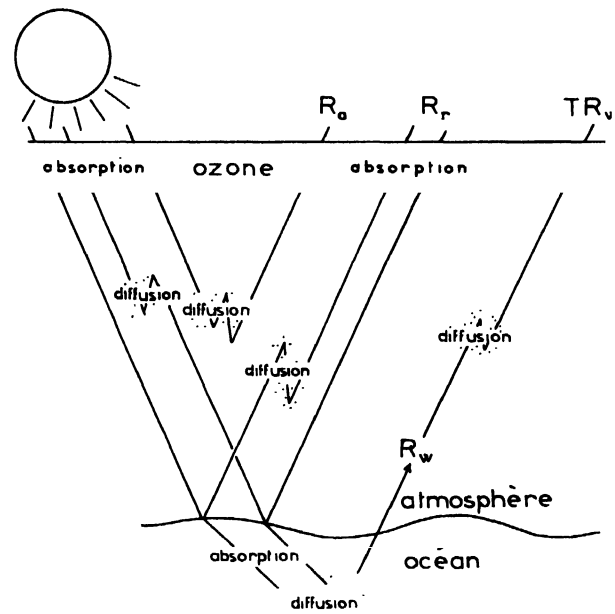


Figure 1. Representation schematique de la decomposition du rayonnement reçu par le capteur.

La luminance étant une grandeur dépendant des conditions d'éclairement local, elle est transformée en réflectance spectrale suivant la formule :

$$R(\theta_o, \Phi_o, \theta, \Phi) = \pi.L_\lambda(\theta, \Phi)/(E_{o\lambda} . \cos\theta_o)$$

où θ_o, Φ_o, Φ et θ sont les angles zenitaux et azimutaux respectivement solaire et de visée, et $E_{o\lambda}$ l'éclairement solaire instantanné. La réflectance spectrale, indépendante des conditions d'éclairement, représente le rapport de l'éclairement solaire ascendant sur l'éclairement solaire descendant. La réflectance totale peut se décomposer en trois termes :

$$Rtot = R_r + R_a + tR_w$$

qui représentent les contributions respectives de la réflectance due à la diffusion Rayleigh des molécules d'air, de celle due a la diffusion des aérosols atmosphériques (vapeur d'eau et poussières), et enfin de la réflectante issue de l'eau, qui nous intéresse (figure 1). Cette dernière est en effet modifiée sélectivement en fonction de la longueur d'onde par son parcours dans l'eau, en fonction de la concentration de l'eau de mer en ses divers constituants (matières minérales en suspension, pigments chlorophylliens du phytoplancton, substances dissoutes).

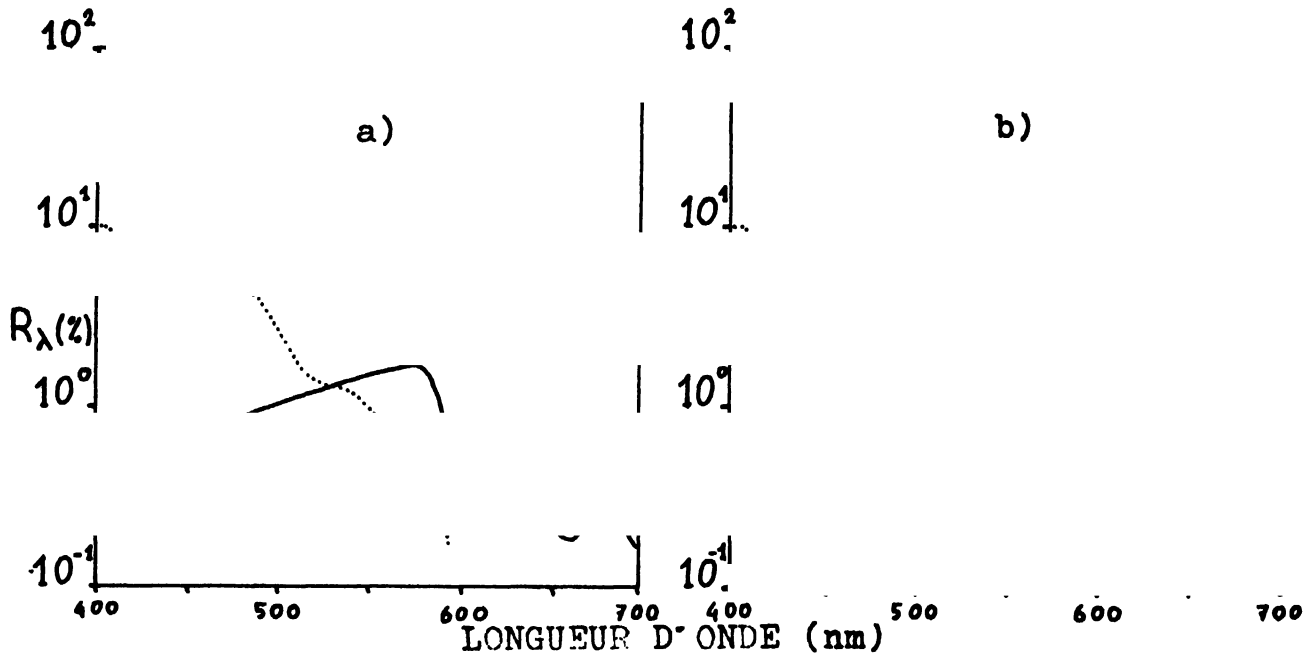


Figure 2. Exemples de variations spectrales de la reflectance issue de l'eau, R (%) mesuree in situ :
a) dans une eau de mer ne contenant que du phytoplanction
b) dans une eau de mer contenant essentiellement des matieres minerales particulaires en suspension en pointilles : spectre de reflectance de l'eau de mer pure
D'après Sathyendranath et Morel, 1981.

2.2 Correction atmosphérique

Elle consiste en l'extraction du terme Rw de la réflectance totale. Le seul paramètre dont l'estimation n'est pas immédiate est le terme Ra, reflectance due a la diffusion par les aérosols, la nature de ces derniers étant encore mal connue, surtout en zone intertropicale. Le terme Ra est estimé à partir du canal 4 (rouge) de CZCS pour lequel la réflectance issue de l'eau, Rw, est généralement très faible et considère comme nulle. Il est ensuite possible, connaissant la valeur de Ra pour le canal 4 et en faisant certaines hypothèses sur le type d'atmosphère, d'extrapoler les termes Ra et donc de calculer la réflectance de l'eau Rw pour les canaux 1 a 3.

2.3 Redressement géométrique

L'image de réflectance est ensuite redressée geométriquement. Comme pour tout satellite à defilement, deux possibilités de redressement sont offertes :

- par détermination d'amers et calcul d'un polynome de déformation;
- par utilisation directe des paramètres orbitaux, ou d'une grille de localisation calculée à partir de ces derniers et accompagnant les données.

2.4 Propriétés optiques et classification des eaux de mer

La réflectance issue de l'eau peut s'exprimer par une relation simple : $Rw = O.33\ b_b/a$, où b_b et a sont les coefficients de rétrodiffusion et d'absorption totaux de l'eau de mer. Ces derniers se décomposent par additivité des coefficients élémentaires b_{bi} et a_i des constituants présents dans l'eau de mer à une concentration C_i, sous la forme :

$$a = a_w + c_i a_i$$
$$b_b = b_{bw} + c_i b_{bi}$$

Les particules minerales en suspension sont caractéristisées par une diffusion importante dans l'ensemble du spectre visible et une absorption faible, ce qui confère à l'eau de mer turbide une reflectance élevee dans l'ensemble du spectre visible (figure 2). Au contraire, les pigments chlorophylliens du phytoplancton provoquent une absorption importante à 443 nm, pic d'absorption de la chlorophylle a, et une diffusion négligeable. Il en résulte une reflectance plus faible à 443 nm que dans le reste du spectre (figure 3), et d'autant plus faible que la concentration en chlorophylle est importante.

Ces propriétes servent de base à des classifications optiques des eaux de mer. La plus utilisée est celle de Morel. Il distingue des eaux du cas 1 pour lesquelles l'activité du phytoplancton possède une action prédominante sur les propriétés optiques de l'eau et où ne figurent pas d'autres substances que celles provenant de cette activité. Les eaux du cas 2 sont caractérisées par la présence, même à faible dose, de sédiments marins et particules terrigènes en suspension ou de substances dissoutes, associées ou non à une activité phytoplanctonique.

2.5 Algorithmes de détermination des constituants marins

Leur élaboration découle directement des propriétés précédentes d'absorption et de diffusion de chaque constituant de l'eau de mer, mais aussi de l'appartenance de cette dernière aux catégories optiques définies plus haut.

Plusieurs algorithmes de détermination de la concentration en pigments chlorophylliens ont été proposées

Tableau 1 : caractéristiques des 6 canaux CZCS

n° canal	λ Centrale (nm)	Largeur (nm)	Rapport signal/bruit (radiance entrée en mW. cm^{2}.ster^{-1}. µm^{-1})
	443	20	150 jusqu'à 5,41
	520	20	140 jusqu'à 3,50
	550	20	125 jusqu'à 2,86
	670	20	100 jusqu'à 1,34
	750	100	100 jusqu'à 10,8
	11 500	2 000	0,220°K à 270°K

par différents auteurs. Ils sont généralement définis à partir des valeurs de la réflectance de l'eau (Rw) dans les canaux 1 et 2 ou 2 et 3, suivant la gamme de concentration mesuree. Ils sont de la forme :

$$C \text{ mg/m3} = a(R_w(\text{canal 1 ou 2})/R_w(\text{canal 3}))b$$

La teneur en particules, minérales ou non, contenues en suspension dans l'eau de mer (habituellement déterminée par filtrage) peut également être en partie estimée à partir de la réflectance de l'eau dans le canal 3.

REFERENCES

Gordon H.R., Clarck D.K., Brown J.W., Brown O.B., Evans R.H., Breenkow W.W., 1983. Phytiplancton pigments concentrations in the middle atlantic bight : comparison of ship determinations and CZCS estimates, Appl. Optics, 22, 20.

Jerlov N.G., 1976. Marine Optics, Elsevier scientific oceanography series, 14, Elsevier Amsterdam, 2nd ed., 203 p.

Morel A., Prieur L., 1977. Analysis of variations in ocean color, Limnol. Oceanogr., 22, 4.

Platt T., Herman A.W., 1983. Remote sensing of phytoplancton in the sea : surface layer chlorophyll as an estimate of water-column chlorophyll and primary production, Int. J. Remote Sensing, 4, 2, 343-351.

Sathyendranath S., Morel A., 1981. Light emerging from the sea; interpretation and uses in remote sensing.

Sturm B., 1981a. Ocean color remote sensing and quantitative retrieval of surface chlorophyll in coastal waters using NIMBUS-7 CZCS data. Oceanography from space, J.F. Gower ed., Plenum Publish Corp., 267-279.

Viollier M., 1980. Teledetection des concentrations en seston et pigments chlorophylliens contenus dans l'ocean. Thèse d'etat, 503, Univ. Lille I.

Yentsch C.S., Phinney D.A., 1982. The use of the attenuation of light by particulate matter for the estimate of phytoplankton chlorophyll with reference to the CZCS. J. Plankton Res., 4, 93-102.

4.3 Correction géométrique d'image

par J. C. BERGES *

* Ingenieur informaticien
au Centre de Recherches Oceanographiques
de Dakar Thiaroye.

Les images produites par les satellites d'études de l'environnement sont très déformées, et leur utilisation exige l'emploi de logiciels de rectification géométrique différant notablement de ceux utilisés pour les satellites d'observations terrestres. Nous décrivons le logiciel de redressement de la chaîne de prétraitement NOAA/AVHRR développée au Centre de recherche océanographique de Dakar Thiaroye. Les algorithmes mis en œuvre dans cette chaîne sont également applicables aux localisations d'images provenant de systèmes similaires par l'orbitre et le type de capteurs comme Nimbus/CZCS ou MOS/VTIR.

Les satellites de la série TIROS-N sont des satellites météorologiques à orbitre polaire gérés par la NOAA, aussi sont-ils désignés en NOAA x. Le premier a été lancé en 1978, et actuellement les satellites NOAA 9 et NOAA 10 sont opérationnels (Schwalb, 1978). Ils emportent principalement un imageur AVHRR fonctionnant dans cinq canaux, un sondeur vertical destiné à restituer les profils d'atmosphères et le système de localisation Argos. Leurs missions sont complémentaires de celles des géostationnaires, la moins grande répétitivité étant compensée par une résolution spatiale plus fine, une plus grande précision radiométrique et la possibilité d'observer les pôles.

Ces satellites sont héliosynchrones et conçus pour fournir une image quotidienne complète de la planète, à la fois en orbite diurne et en orbite nocturne. Leurs trajectoires sont quasi-circulaires à une altitude de 870 km de manière à reduire les perturbations liées à l'atmosphère. Sur NOAA, comme sur la plupart des satellites d'observation, l'inclinaison est calculée de telle sorte que le mouvement de précession qu'elle provoque compense le mouvement annuel de la terre autour du soleil. De la sorte le passage au nœud ascendant (cf fig. 1) se fera toujours à la même heure locale. Les deux satellites opérationnels simultanement permettent donc une couverture globale de la terre toutes les six heures.

La période nodale du satellite (102 minutes), imposée par son altitude, amène un décalage entre les positions de deux ascendants successifs de 25° de longitude. Afin que les images correspondants à deux orbites successives se recouvrent à l'équateur, l'angle de balayage du radiomètre AVHRR doit être particulièrement large (110°). Aussi la taille d'un pixel va varier suivant sa position sur l'image, de 1.1. km au nadir à 4.5. km en bord d'image. Ceci se traduira par une anamorphose d'autant plus accentuée que la zone considérée est proche du bord de l'image.

Les produits de ce type d'imageur possèdent un aspect plus déroutant que ceux d'un géostationnaire où la projection du satellite est proche d'une projection stéorographique équatoriale. Par ailleurs les caractéristiques orbitales créent un décalage quotidien de 2.7° du nœud ascendant, et à un jour d'intervalle une même zone subira un décalage équivalent dans la projection du satellite. Aussi les études multitemporelles exigent que les images soient ramenées à un référentiel unique par un programme de redressement.

Une procédure générale de redressement consiste à calculer pour tous les points de l'image brute leurs coordonnées dans le repère terrestre. Chaque pixel sera localisé en fonction de l'heure de la mesure et des paramètres orbitaux décrivant l'orbitre et la position du satellite (quatre paramètres en orbitre circulaire et six en orbitre elliptique).

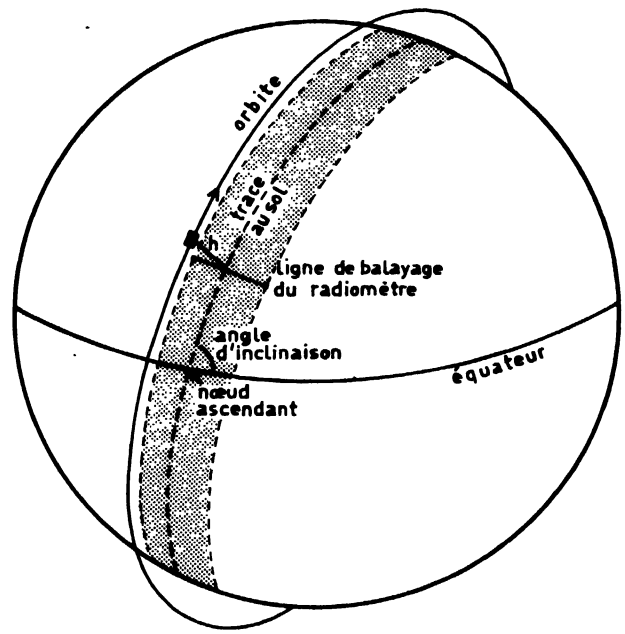


Figure 1. Representation de la trajectoire d'un satellite défilant autour de la terre.

La localisation revient à composer les trois mouvements suivants :

- Le mouvement de rotation du plan d'orbite dans le référentiel terrestre. Ce mouvement est la composition de la précession et de la rotation quotidienne de la terre sur elle-même.
- Le déplacement du satellite sur son orbitre elliptique.
- Le balayage du radiomètre qui vise successivement tous les points d'une ligne.

La navigation se ramène alors à la résolution d'une série d'équations trigonométriques, particulièrement

simples pour une orbite circulaire. On trouvera un exposé sur ces méthodes de calcul dans Brunel et Marsouin (1985), ou Duck et King (1983).

Si ces paramètres orbitaux étaient parfaitement connus il serait donc possible de localiser exactement un pixel. Malheureusement un certain nombre de forces pertubatrices s'exercent sur le satellite.

L'altitude n'est pas suffisante pour que les phénomènes aérodynamiques puissent être totalement négligés. En utilisant une formule d'approximation exprimant la vitesse de variation d'altitude liée aux frottements atmosphériques, on obtient une décroissance de 0. 3 m/jour pour les satellites NOAA. Cette variation est du même ordre que celle déduite des messages orbitraux qui indiquent une décroissance moyenne de 0.6 m/jour pendant l'été 1986. D'autres phénomènes parasites interviennent. Ainsi il est apparu d'une analyse sur les dérivations d'orbite TIROS et Nimbus que l'attraction solaire amenait une vibration du plan d'orbite et donc une modification de l'inclinaison (Duck, 1975). Enfin bien que la plate-forme soit dotee d'un système de stabilisation trois axes, des variations d'attitude peuvent perturber les visées. La NOAA indique que ces variations seront en général inférieures à 0.12°, ce qui correspond à un decalage de un ou deux pixels.

Sous l'effet de ces forces perturbatrices le satellite va décrire une courbe gauche qui pourra toujours être approximée, pour une portion de trajectoire donnée, par une ellipse. La connaissance des paramètres osculateurs, définissent cette orbite elliptique instantanée, est donc indispensable pour naviguer les images NOAA.

Des messages TBUS, contenant ces informations, sont régulièrement diffusés sur le réseau telex. Mais si la précision de ces informations est suffisante pour piloter l'antenne de réception lors de l'acquisition, elle ne permet pas une navigation fine et entraînerait des erreurs importantes de localisation. La méthode mise au point au Centre de météorologie spatiale de Lannion (CMS) par P. Brunel et A. Marsouin (1985) consiste à utiliser les messages de localisation ARGOS, réputés de meilleure qualité que les messages TBUS, et a appliquer un mdoèle d'extrapolation d'orbite pour déterminer les paramètres osculateurs de la période d'acquisition. Cette méthode fournirait une erreur moyenne de 5 km.

Pour notre part, nous avons mis en œuvre une méthode d'approximation de paramètre inspirée d'un algorithme développé au Centre scientifique IBM

Figure 2. Les deux premieres images brutes d'un canal NOAA montrent le décalage vers l'Ouest d'une zone dans la projection du satellite, ainsi que les déformations sensibles en bord d'image. La dernière image montre une scène redressée sur le Senegal.

France (Ho et Asem, 1986). Cette méthode consiste à fixer un amer puis à modifier les paramètres osculateurs à chaque étape d'une procédure itérative. La procédure s'arrêtera lorsque les latitudes et longitudes des amers calculées par le modèle orbital et leurs coordonnées géographiques réelles seront suffisamment proches. La précision obtenue est alors inférieure à 2 km.

Cet algorithme de redressement diffère notablement des algorithmes de redressement sur amers usuellement employés. D'une part le nombre de points d'appui est notablement moins important. Compte tenu des déformations NOAA, un modèle n'intégrant pas les calculs orbitaux en nécessiterait une dizaine. D'autre part les amers ne figurent pas nécessairement sur l'image à redresser, ce qui est un avantage notable pour travailler sur un domaine marin. Il s'agit de points remarquables situés en un quelconque endroit de l'image brute, ils seront donc beaucoup plus faciles à repérer. Enfin les calculs seront plus rapides.

Afin d'améliorer les temps de traitements, les calculs orbitaux ne seront effectués que pour les nœuds d'une grille de localisation, la fonction de redressement sera ensuite calculée par interpolation. La grille déterminée le redressement se ramènera à une interpolation bidimensionnelle. Bien qu'elle soit conceptuellement simple cette partie est d'une implémentation délicate, et justifiera des efforts d'optimisation.

Bien que plus simples, les algorithmes de redressement METEOSAT sont mis en œuvre de manière analogue (Ho et Asem, 1985). La partie de constitution de la grille est notablement plus rapide puisque, par définition, les paramètres de navigation sont fixes. D'autre part les images ne proviennent pas directement de l'imageur du satellite, mais sont traitées par le centre de réception de Darmstad et corrigées des dérivations d'orbite, puis réemises vers le satellite.

BIBLIOGRAPHIE

Bernstein R., 1983. Image geometry and correction. Manuel of remote sensing.

Brunel P., Marsouin A., 1985. Positionnement géographique des images NOAA/AVHRR. Cahier Satmos N 2.

Duck K., 1975. Long period nodal motion of sun-synchronous orbits, Goddard Space Flight Center Report X-726-75-215.

Duck K., King J., 1983. Orbital mechanics for remote sensing. Manual of remote sensing.

Duclou P., 1981. L'attitude des satellites d'observation de la terre. Document de travail CNES.

Ho D., Asem A., 1986. NOAA AVHRR image referencing. International journal of remote sensing.

Ho D., Asem A., 1985. Navigation of METEOSAT visible and infrared images ESA 5eme congrès des utilisateurs scientifiques.

Legendre P., 1986. Les orbites utilisées pour les missions d'observation. Document de travail CNES.

Schwalb A., 1978. The TIROS N/NOAA A-G satellite serie. NOAA technical memorandum NESS 95.

4.4 Restitution de la température de surface de la mer à la résolution météosat par intégration de données exogènes

par H. DEMARCQ * et J. CITEAU *

1. APPORTS DE LA MESURE SATELLITAIRE INFRAROUGE

La température de surface est sans doute un des paramètres les plus fondamentaux de l'environnement en océanographie physique et biologique. Ses moyens de mesure sont variés et dépendent essentiellement de la précision et de la fréquence de mesure exigée. Les satellites d'observation permettent une vue synoptique par des observations répétées, à une échelle spatiale de l'ordre du kilomètre. Les plus utilisés en océanographie sont les satellites à défilement, comme ceux de la série NOAA qui possèdent une résolution spatiale et radiométrique élevée (1 km et 0.5 degré). Malgré leur répétitivité d'observation de 24 heures parfois peu adaptée à une utilisation en continu des données en zone nuageuses, ils sont assez adaptés à des études globales. Le coût des données ainsi que la relative complexité de leur traitement les rend cependant difficilement utilisables pour un suivi régulier sur des zones vastes ou à forte variabilité temporelle, nécessitant un volume élevé de données. On leur préférera alors les satellites géstationnaires, pour le faible coût de leurs données et leur répétitivité d'observation élevée, malgré une resolution géométrique moindre.

Le capteur infrarouge thermique du satellite géostationnaire METEOSAT II permet la mesure de la température radiative de la surface du globe terrestre avec une résolution spatiale de 5 kilomètres à l'équateur, une résolution radiométrique de 0,5 degré et une répétitivité de 30 minutes. Situé par 0 degré de longitude, il permet une observation exceptionnelle de l'océan Atlantique oriental, notamment des côtes ouest-africaines soumises aux vents alizés, permanents ou saisonniers. Ces derniers induisent un des plus importants upwelling du monde, dont les variations spatio-temporelles visibles par le biais de la température de surface de la mer sont très importantes. Si la température radiative mesurée par le capteur est facilement déductible de la mesure satellitaire par calibration interne, il n'en va pas de même pour la valeur absolue de la température de surface. Le signal marin est en effet systématiquement perturbé par les facteurs atmosphériques (nuages, vapeur d'eau, aérosols) qui induisent une erreur importante importante sur cette valeur absolue. On a donc nécessairement recours à des données exogènes pour corriger la mesure satellitaire, soit directement, par des mesures atmosphériques, soit indirectement, par confrontation avec des mesures de températures obtenues par d'autres moyens. Dans le cas du capteur infrarouge de METEOSAT II et de sa couverture géographique importante, l'absence d'information sur l'atténuation du signal dans l'atmosphère à une résolution spatiale compatible (radiosondages par exemple) impose le recours à d'autres données de températures de surface. Celles disponibles par le réseau mondial de navires marchands sont particulièrement adaptées à des études à grande échelle et pallient avantageusement le faible volume de données fournies par les campagnes océanographiques.

2. TRAITEMENT DES DONNEES METEOSAT ET INTEGRATION DES DONNEES EXOGENES

2.1. Origine et nature des données

Des syntheses thermiques sont réalisées par période de 5 jours au Centre de météorologie spatiale de Lannion, à partir de plusieurs images par jour du globe METEOSAT entier. Elles sont élaborées par maximum thermique point par point. L'hypothèse utilisée est que sur une courte période de temps la température de surface varie peu et que la présence de nuages ou de vapeur d'eau a toujours tendance à diminuer le signal mesuré par le capteur. Ce procédé a pour avantage, outre une compacité accrue de l'information, d'éliminer au maximum l'influence des masses nuageuses — plus froides — qui se déplacent au cours de la période de synthèse. Les images résultantes ont une taille de 2 048 lignes par 2 048 points. Néanmoins, la dérive atmosphérique reste importante sur la majeure partie de l'image en raison de l'absorption atmosphérique moyenne pendant la période de synthèse, principalement par les aérosols et la vapeur d'eau. Une correction du champ de température est donc absolument nécessaire, l'absorption atmosphérique dépassant couramment plusieurs degrés. Les synthèses brutes sont traitées par une chaine de programmes spécifiques développée à l'unité de traitement d'images satellitaires (UTIS) du Centre de recherche océanographique de Dakar-Thiaroye (CRODT).

La figure 1 illustre l'ensemble des étapes du traitement qui fait appel à un seul type de données exogènes, à savoir les mesures de température de surface recueillies par le réseau météorologique mondial de navires marchands. On se reportera à cette figure à chaque étape du traitement décrit ci-dessous.

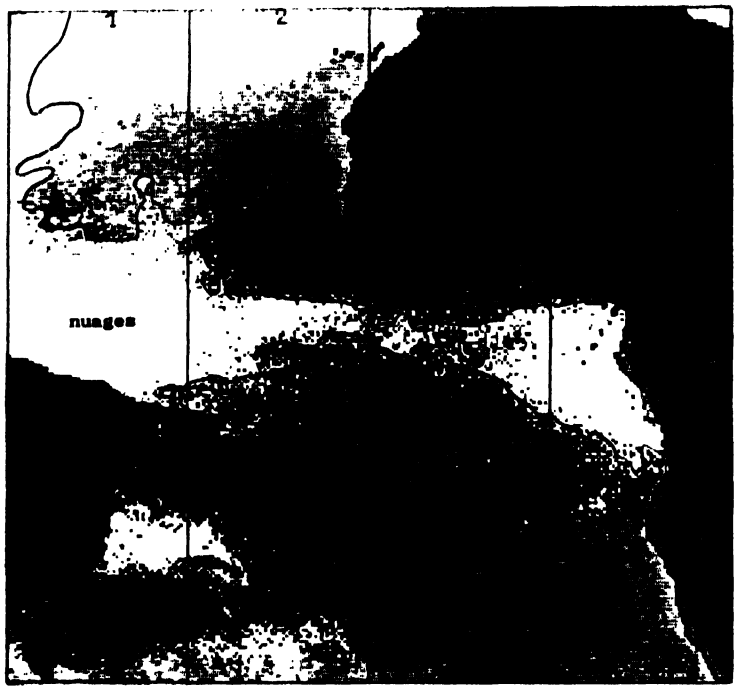
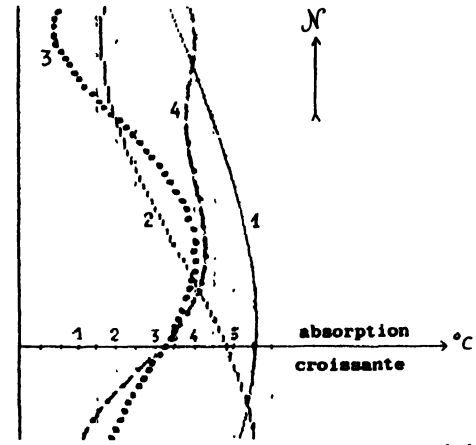
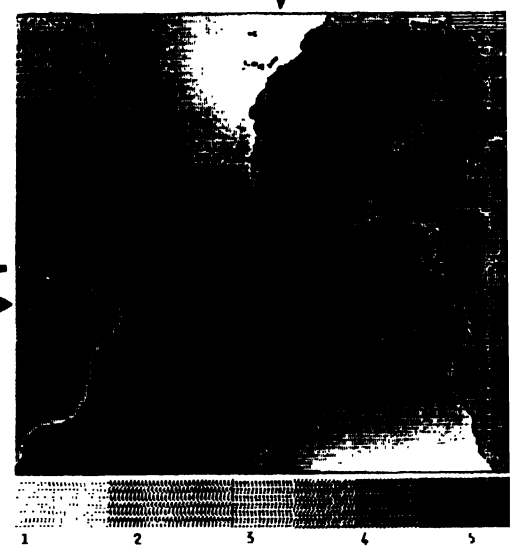


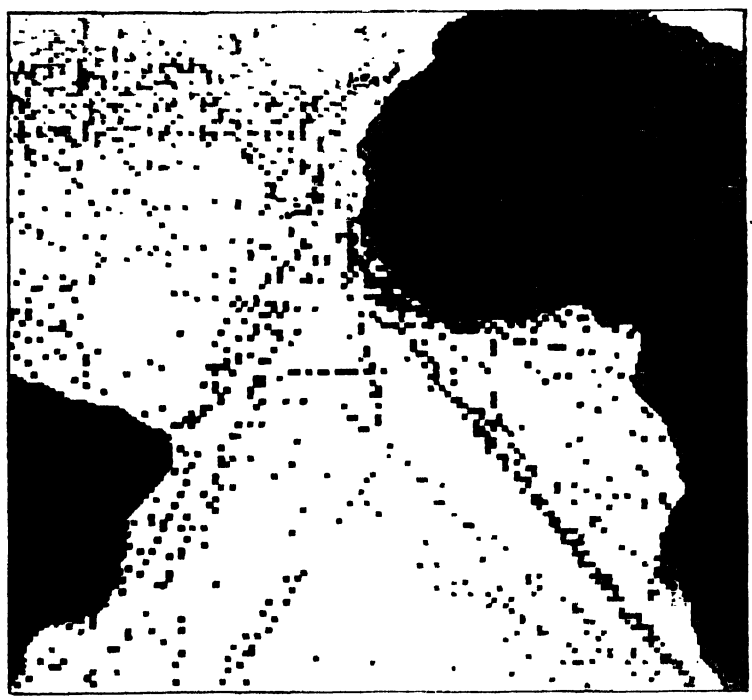
Image METEOSAT infra-rouge réalisée par synthèse temporelle sur la période du 1er au 8 février 1984, à partir de 3 images par jour. L'image est redressée en projection géographique et masquée de la terre. Un masque des nuages est réalisé grâce à une procédure automatique de seuillage par comparaison avec la température moyenne climatique. L'absorption atmosphérique est minimisée car seul le maximum thermique rencontré en chaque point de chaque image élémentaire est conservé. Les températures augmentent du blanc (16°C) vers le noir (28°C)



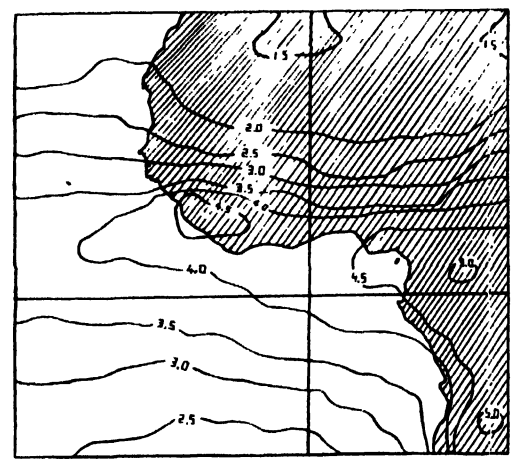
L'absorption atmosphérique est calulée statistiquement par différences avec les données des navires et modélisée sur 4 radiales N-S (ci-dessous). Le champ bidimentionel associé est ensuite calculé par interpolation (ci-dessous). Cette correction intègre l'ensemble des perturbations dues à l'atmosphère ainsi que les différences d'angle de visée du satellite.



absorption atmosphérique mesurée en °C



Températures mesurées par les navires marchands et diffusées par le Système Mondial de Transmissions, sur la période du 1er au 15 février 1984 (environ 3000 données).
Les températures augmentent du blanc vers le noir.



Exemple de répartition du contenu intégré en vapeur d'eau de l'atmosphère (en g/cm²) mesuré en novembre de 1980 à 1985.

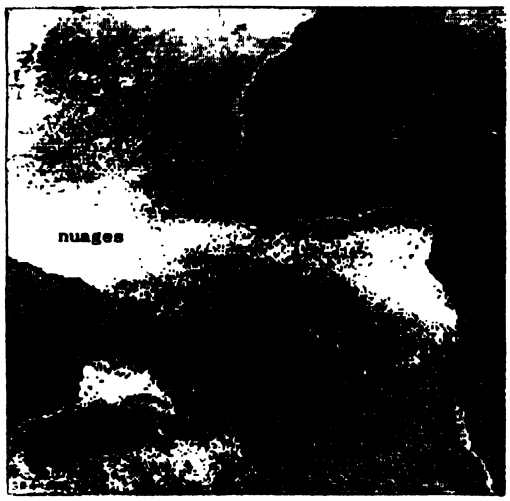
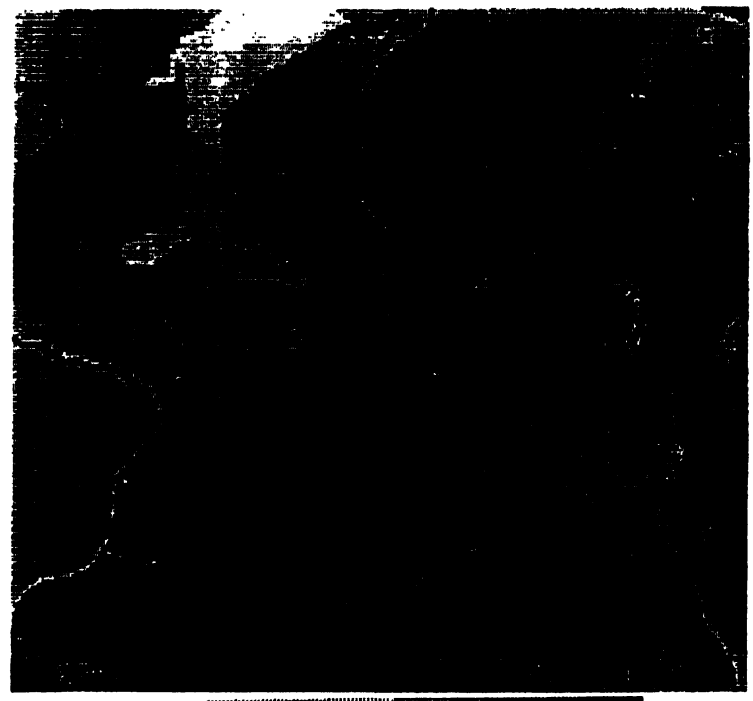
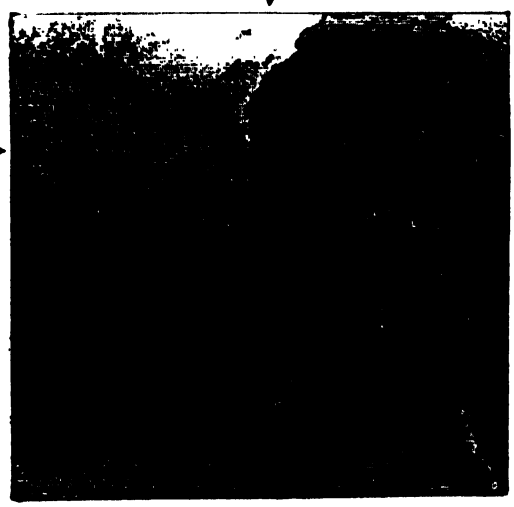


Image METEOSAT initiale corrigée de l'atmosphère par le champ d'absorption calculé précédemment.



Anomalies de température calculées à partir de la carte finale, par référence à la climatologie de REYNOLDS.

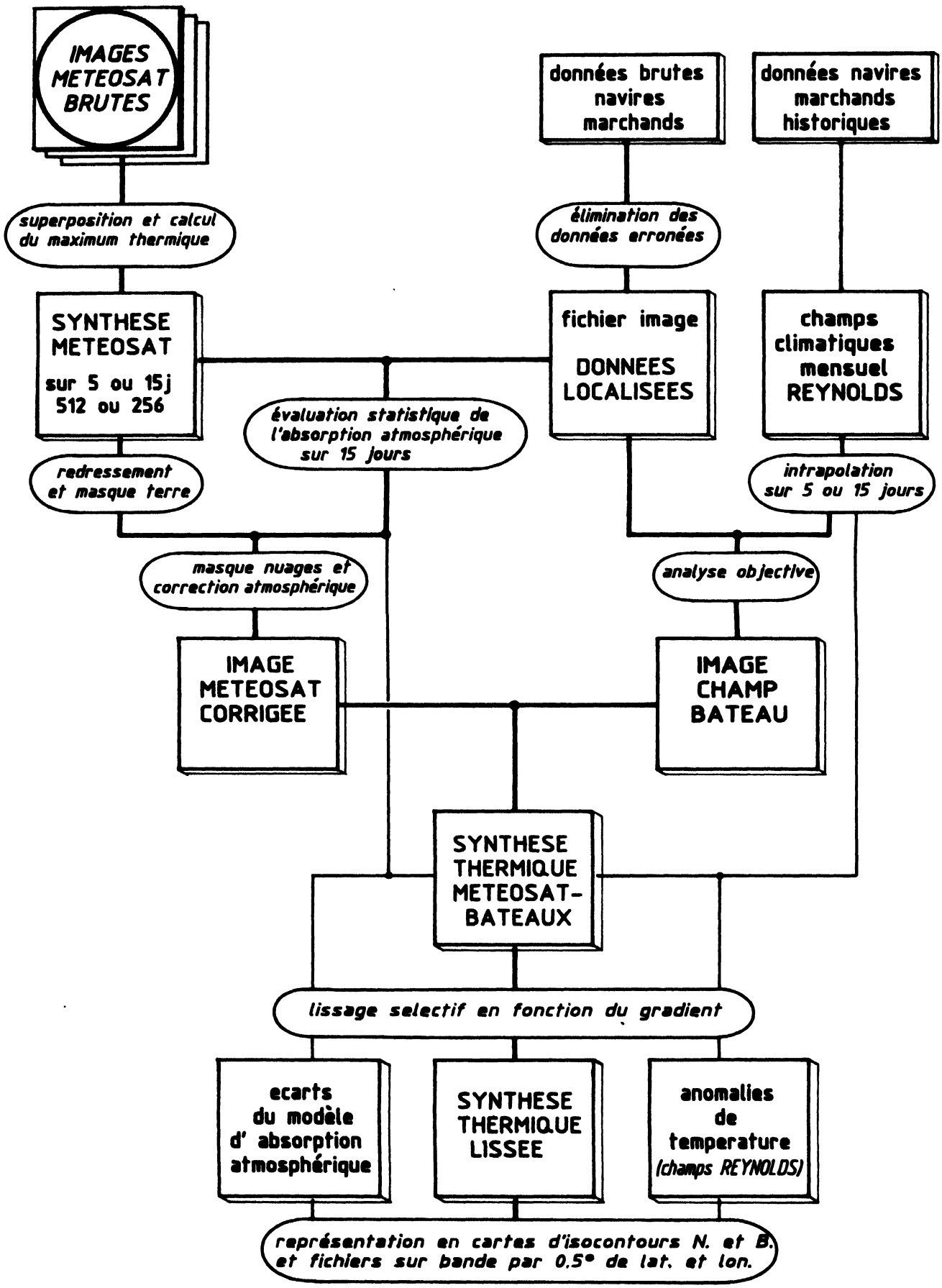
climatologie de REYNOLDS



Même image que ci-dessus sur laquelle les zones couvertes par les nuages ont été remplacées par le champ de température calculé à partir des seules données bateaux.

Produit final température de surface résultant de la carte ci-contre par lissage sélectif en fonction du gradient marin. La carte est également produite en isocontours (voir page suivante).

RESTITUTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER A LA RESOLUTION METEOSAT



2.2. Sélection des données et redressement géométrique

Une lecture des données METEOSAT sur bande magnétique et un redressement simultané de l'image suivant une projection équotoriale équidistante directe sont tout d'abord réalisés. Les images redressées sont ensuite masquées des zones terrestres pour faciliter les traitements ultérieurs. Toutes les données disponibles du réseau de navires marchands sont alors utilisées sur la période d'étude et servent de base au calcul d'un champ d'absorption atmosphérique.

2.3. Calcul statistique du champ d'absorption atmosphérique

Ce dernier est estimé en chaque point où une donnee bateau existe, par différence entre temperature radiative mesurée par le capteur et temperature réelle mesurée par les navires. Un champ de différences est ainsi calculé statistiquement sur toute l'image par ajustements polynomiaux. Ce champ est calcule sur l'ensemble de l'Atlantique tropical pour une période de 15 jours et sur une maille d'environ 20 km, éventuellement rééchantilloné pour des utilisations regionales sur des images METEOSAT à pleine resolution, puis applique en retour sur l'information METEOSAT initiale (voir figure, flèche noire). Parallèlement, un champ continu de température est crée par analyse objective à partir des seules données du réseau de navires marchands.

2.4. Cas des zones à très forte absorption

Le champ « bateau » precédemment calculé vient en remplacement de l'information METEOSAT initiale, uniquement au-dessus des zones marines pour lesquelles l'absorption atmosphérique est telle que le gradient de température radiative mesuré par le satellite n'est plus représentatif du gradient marin, mais principalement du gradient atmosphérique de température.

2.5. Lissage de l'image finale et calcul des anomalies de température

La synthèse thermique résultante est ensuite lissée par un lissage conditionnel fonction de l'intensité du gradient marin. Une carte d'anomalies de température est également calculée sur la même zone par différence entre la synthèse précédente et le champ climatique de références calculé sur la même période à partir des champs climatiques REYNOLDS. Ces derniers sont etablis à partir des données historiques des navires marchands et définis par degré de latitude et de longitude. Les cartes ainsi obtenues sont enfin reproduites sous formes d'isocontours, en noir et blanc (fig. 2).

2.6. Utilisation et limites de la méthode

Cette chaîne de traitement est actuellement appliquée en routine à la résolution METEOSAT sur une zone s'étendant au large du Senégal et de la Mauritanie et à une resolution spatiale moindre sur l'ensemble de l'Atlantique tropical. La cartographie de la température de surface de la mer ainsi realisee s'avère supérieure en résolution au produit americain du National Weather Service etablit par quinzaines, notamment au niveau des zones côtières et des upwellings côtiers et équatorial (voir partie « analyse et limite des méthodes sur quelques cas régionaux »).

* Oceanographes de l'ORSTOM, Centre de Recherches Océanographiques de Dakar Thiaroye, BP 2241, Dakar (Senegal).

4.5 Cartographie automatique des champs thermiques de surface par synthèse d'images de télédétection et de données in situ

par
Francis GOHIN
Service Application
de la Télédetection
IFREMER
BP 70
29263 PLOUZANE

1. PRESENTATION DU LOGICIEL PESKET

Le logiciel Pesket (Pêche, satellite et Krigeage en température) a été conçu a l'IFREMER avec la participation de l'ORSTOM dans le but d'établir des cartes d'isothermes à partir d'observations d'origines diverses. Les données traitées peuvent provenir des satellites météorologiques, TIROS de la NOAA et Meteosat de l'Agence spatiale européenne ainsi que des bateaux collaborant au Système mondial de transmission géré par l'Organisation météorologique mondiale. Le premier type de donnees s'apparente au format Image alors que le second, constitué de données in situ, appartient au domaine plus classique des mesures ponctuelles dont l'étude peut être faite par la théorie des variables régionalisées.

La gestion des données (format des fichiers, lecture et écriture) issues des scènes des satellites s'effectue par des appels à des modules appartenant à la bibliothèque du logiciel de traitement d'image GRINGO développé à l'IFREMER. L'analyse des structures et le mélange des données d'origine spatiale et in situ sont effectués par des programmes provenant du logiciel MAGIK (Méthode appliquant la géostatique et l'interpolateur du krigeage) mis au point à l'ORSTOM. La carte des isothermes produite en fin de traitement est visualisée sur console graphique.

2. PRETRAITEMENT ET SCHEMA D'ENSEMBLE

Les données des satellites sont rectifiées géométriquement et donnent lieu, par combinaison des canaux situés dans l'infra-rouge thermique, à la création d'images en projection Mercator dont la taille du pixel, fixée par l'utilisateur, est adaptée à l'échelle de la carte souhaitée. L'utilisation du satellite Meteosat ne permet pas de définir raisonnablement une taille du pixel inférieure à 4 kilomètres. La discrimination entre mer et nuage est une étape essentielle qui conduit, en situation moyenne, à l'élimination d'une grande partie des pixels de l'image.

La réalisation automatique d'une carte des isothermes par synthèse impose :

- une grande qualité du positionnement de l'image. Après contrôle sur amers et correction des grilles de positionnement fournies avec les images aux formats de type Master (Centre météorologique et spatial de Lannion) ou GAC (NOAA), le positionnement du satellite TIROS, a-priori plus difficile que celui de Meteosat, devient précis au pixel près.
- Une discrimination parfaite entre la mer et les nuages.

Si les données situées sous des nuages hauts sont facilement décelables par la très faible température restituee, les données sous des brumes diffuses et peu épaisses seront plus difficilement écartées. Du fait du caractère automatique des traitements conduisant aux isothermes, il est important de pouvoir disposer d'algorithmes performants dans la reconnaissance des zones douteuses afin de ne pas attribuer à la couche de surface de l'océan des structures qui ne la concernent pas.

De façon à eviter un ecart général entre les données in situ et les images, les temperatures observées par les satellites sont calibrées à l'aide des observations des bateaux situées sous des pixels clairs. Un fichier mixte est crée par rééchantillonnage des images et adjonction des observations in situ. L'origine de la mesure est conservée dans le fichier et sera prise en compte dans l'estimation finale. La figure 1 représente les modules essentiels du logiciel Pesket intervenant dans la réalisation des cartes de synthèse.

A l'expérience, il ressort que les contraintes de qualité des prétraitements ne sont pas un obstacle à la cartographie automatique.

Celle-ci est effectuee par estimation des températures aux nœuds d'un réseau régulier (maille de 15 km par exemple) suivant une fréquence temporelle variable en fonction des conditions nuageuses et des besoins de l'utilisateur. En pratique, on établit une synthèse entre des images de télédétection réparties sur un à deux jours, claires sur les zones de plus grand intérêt, et les données in situ des jours proches (une semaine par exemple). Le rôle des données in situ dont le coût d'acquisition et de prétraitement est bien moindre que celui des images satellites n'est pas de remplacer ces dernières qui sont indispensables mais de permettre une calibration, un contrôle de qualité et un complément d'information utile en zone nuageuse pour peu que la variabilité de la température de surface ne soit pas trop forte.

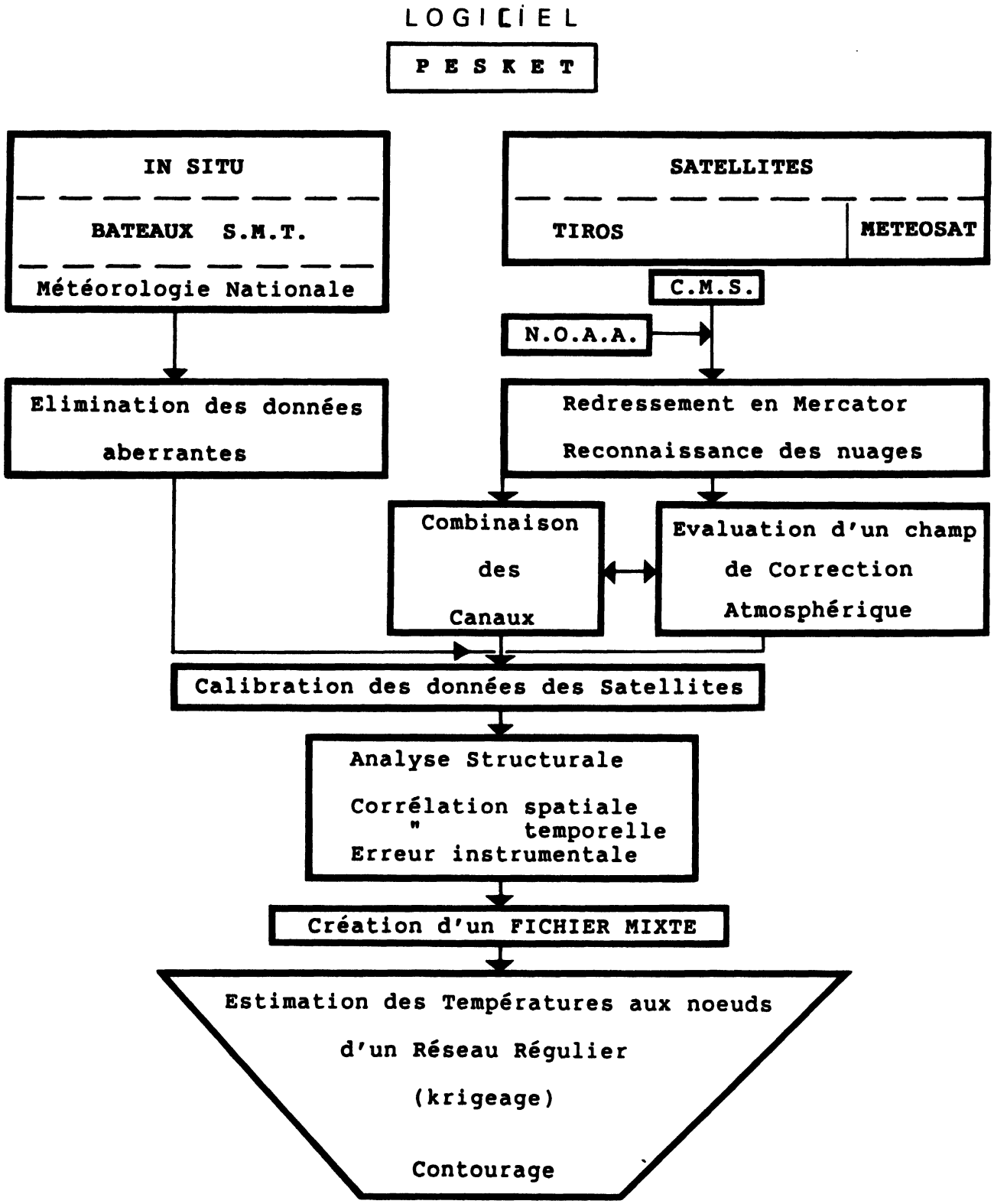


Figure 1 : Realisation d'une carte de synthese

On ne cherchera donc pas à établir des évaluations en suivant une maille aussi fine que celle des images car la variabilité temporelle des structures locales s'opposerait à la prise en compte de données écartées de plusieurs jours. Aussi en fonction de la répartition quotidienne des données in situ est-il nécessaire de définir une maille spatiale et temporelle adaptée. Il faut pour cela procéder à l'analyse des structures de la température de surface et evaluer les différents termes des erreurs associées aux divers instruments.

3. L'ANALYSE STRUCTURALE ET L'INTERPOLATEUR DU KRIGEAGE

3.1. L'analyse structurale

La température observée par satellite T_s (x, t) ou par

bateau T_B (x,t) dépend de la position x et de la date t. La température que nous cherchons à évaluer est par définition la température à la profondeur moyenne des données in situ qui est à la base des atlas climatiques. La profondeur moyenne est mal connue. Elle correspond généralement à celle de la prise d'eau de refroidissement du moteur, à une profondeur moyenne comprise entre 3 et 5 mètres.

Pour des données obtenues au même instant to, on pose les hypothèses suivantes :

– $T_S(x) = T(x) + \epsilon(x) + \epsilon'(x)$

Le premier terme d'erreur ϵ est le bruit instrumental, relativement faible que l'on peut assimiler à un bruit blanc, sans corrélation d'un pixel à son voisin.

Le second terme d'erreur ϵ', plus élevé et plus difficile à évaluer, est lui-même structuré. Ce terme prend en compte les effets locaux dus aux brumes, aux réchauffements éventuels en surface, ... La caractéristique de ce terme d'erreur tient à sa régionalisation qui se traduit par une corrélation non nulle entre les observations de deux pixels voisins.

Un recalage global des données des satellites sur les données in situ permet d'annuler la valeur moyenne des erreurs que l'on pose alors d'espérance nulle. Cela ne signifie pas que leur effet soit localement négligeable.

– $T_B(x) = T(x) + \epsilon''(x)$

ϵ'' est un terme d'erreur essentiellement dû aux variabilités en profondeur des prises de mesure mais

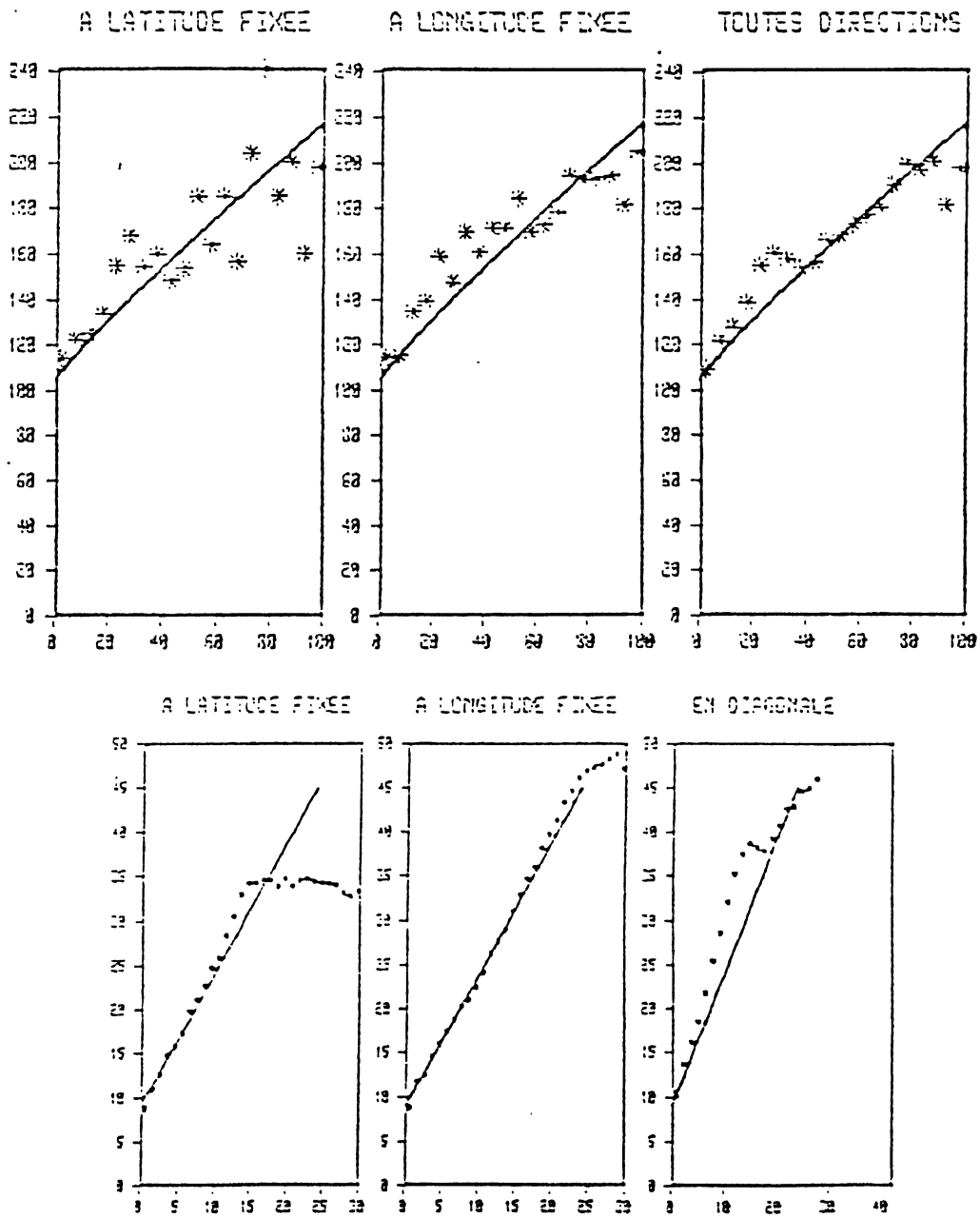


Figure 2 : Demi-variogrammes établis à partir des observations des bateaux et du satellite METEOSAT durant le mois de mai 1987

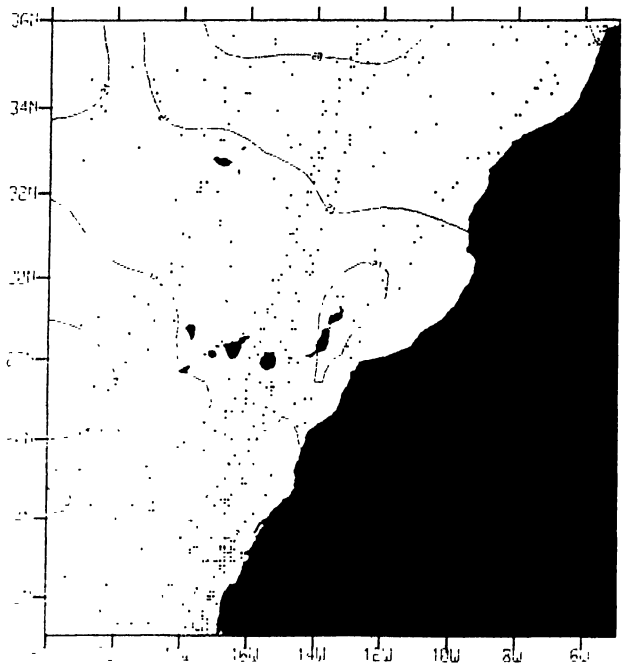


Figure 3 : Cartographie des isothermes au large des côtes du Nord Ouest de l'Afrique

aussi aux erreurs de calibrations du thermomètre et aux erreurs de localisation.

Sa valeur moyenne est nulle par définition. Son écart type est important (de l'ordre de 0,8°C). On note l'absence de corrélation des termes d'erreur provenant de bateaux distincts.

La température de la mer T (x) est elle-même supposée être une variable aléatoire. Pour les estimations, il est indispensable de faire des hypothèses de répétitivité des structures. On pose alors les hypothèses de stationnarité des accroissements :

Soit x et x+h 2 points séparés par une distance h :

En notant E l'espérance mathématique (valeur moyenne)

- $E[T(x+h)-T(x)] = 0$
- $E[T(x+h)-T(x)]^2 = 2g(h)$ où g est le demi-variogramme.

On fait ainsi l'hypothèse que les écarts de température sont en moyenne nulle et ne dépendent, en moyenne

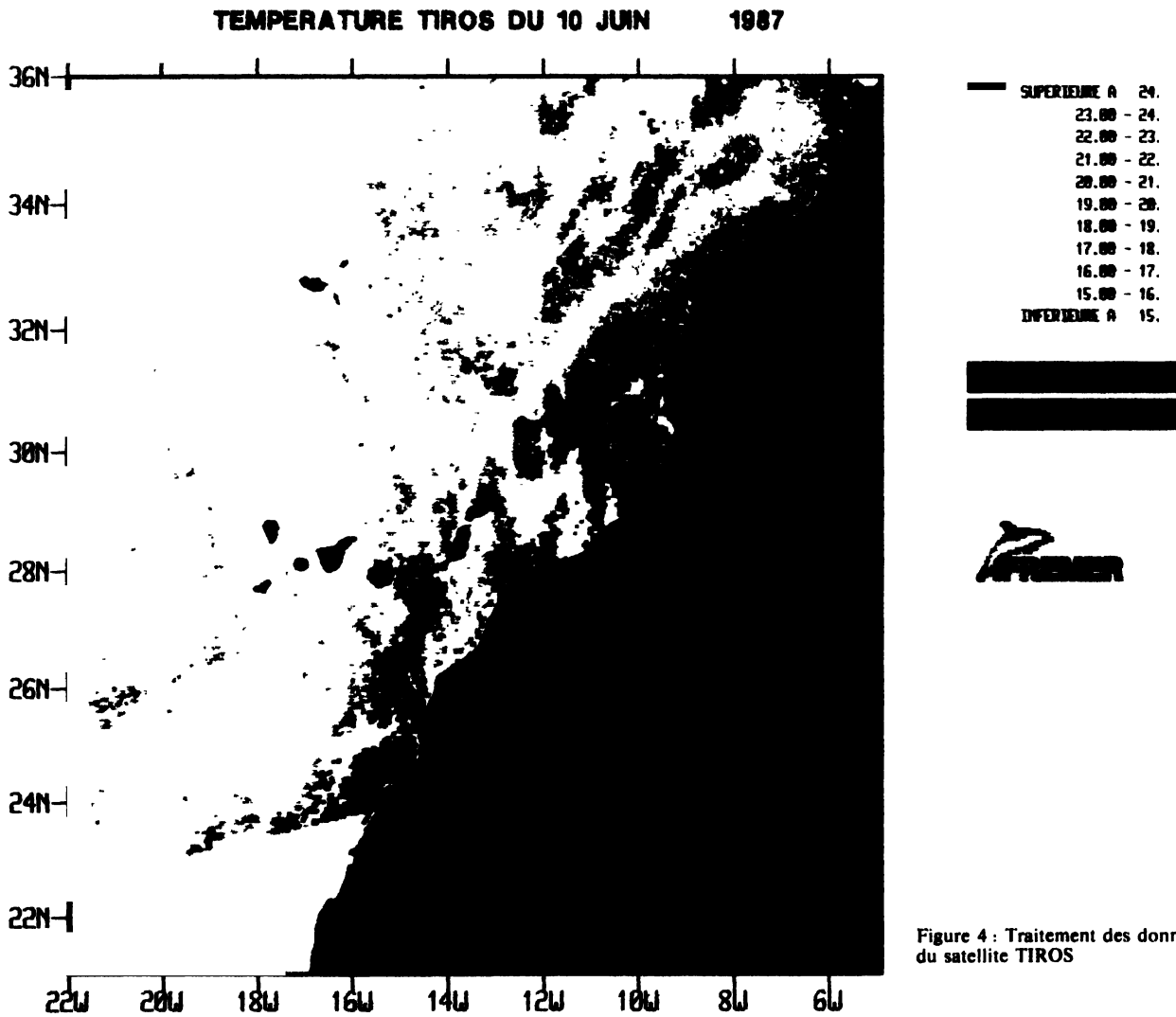


Figure 4 : Traitement des donnees du satellite TIROS

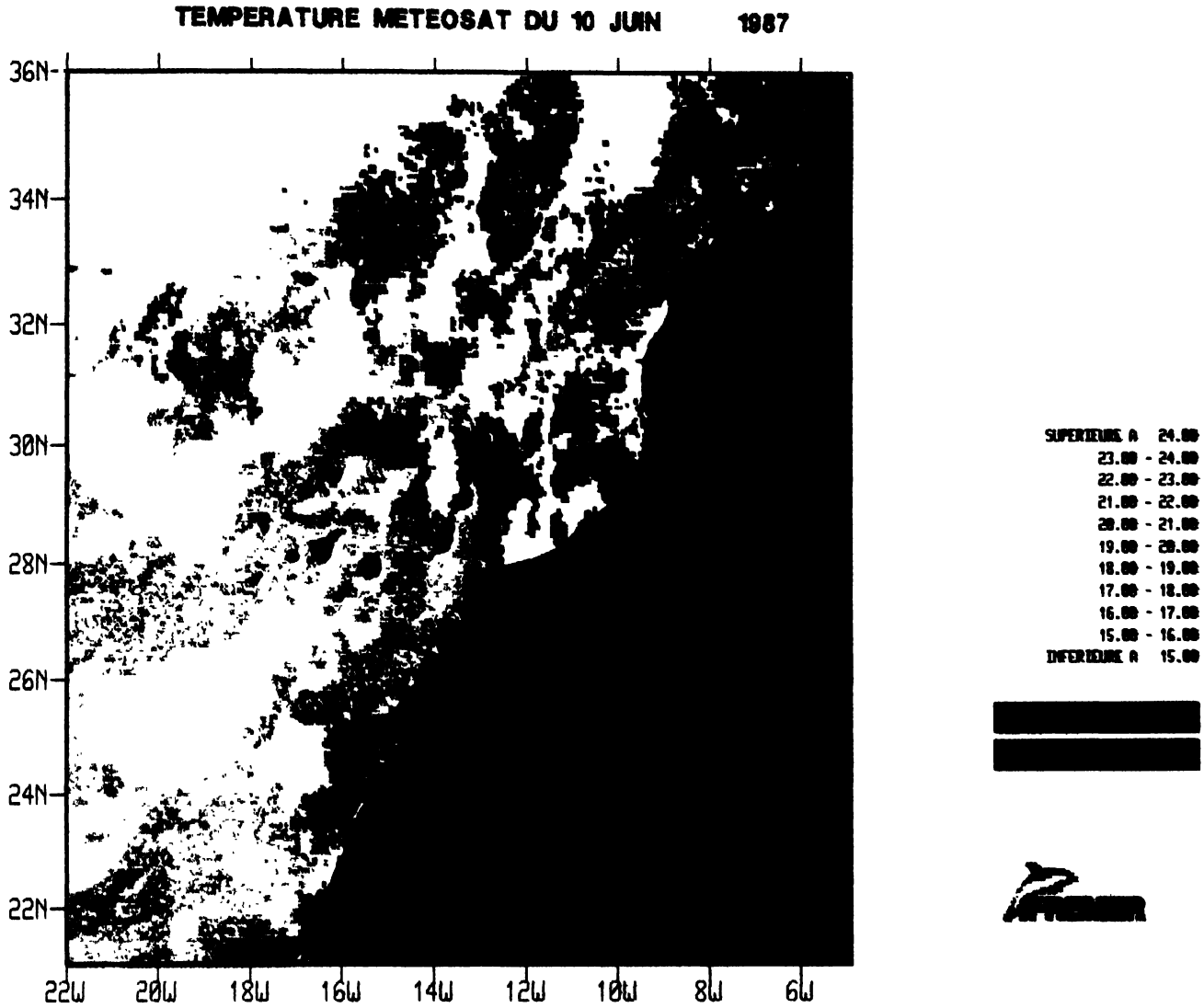


Figure 5 : Traitement des donnees du satellite METEOSAT

quadratique (variance), que de la distance h entre les points et non de la position des points eux-mêmes.

Une modélisation du même type peut être proposée par rapport au temps, une fois la tendance saisonnière filtrée.

La figure 2 présente, à titre d'exemple, des demi-variogrammes établis à partir des observations des bateaux et du satellite METEOSAT durant le mois de mai 1987.

3.2. L'estimation sur un réseau régulier

Les estimations To vont se faire aux nœuds xo d'un réseau régulier à l'aide de l'interpolateur dit du krigeage.

A partir des n températures T_i les plus proches observées aux points (x_i, t_i) par bateau ou télédétection, on pose :

$$T^*_o = \sum_i \lambda_i T_i$$

On recherche les pondérateurs λ_i tels que :

$$E\,[\sum_i \lambda_i T_i] = T_o$$

$$E\,[\sum_i \lambda_i T_i] = T_o \text{ (Non biais)}$$

$$\delta^2_K = E\,[\,T^*_o - T_o]^2 \text{ minimale (Optimalité)}$$

Compte tenu des hypothèses faites sur les structures spatiales et temporelles de la température de surface ainsi que sur les erreurs de mesure, on développe la formule de la variance de krigeage δ^2_K. Les pondérateurs λ_i assurant les conditions de non biais et d'optimalité sont la solution du système linéaire de krigeage obtenu en minimisant l'expression de δ^2_K.

4. EXEMPLE

La cartographie des isothermes au large des côtes du Nord Ouest de l'Afrique est effectuée à l'IFREMER dans le cadre d'un programme d'analyse des relations existant entre l'hydroclimat et la pêcheries de petits pélagiques (sardines essentiellement). La pêche est concentrée dans les eaux côtières soumises, sous l'action du vent, à des remontées d'eaux froides saisonnières plus riches en éléments minéraux. Durant la période du 8 au 15 juin 1987, les données in situ, au nombre de 390 après élimination des données douteuses, donnent lieu à la réalisation des isothermes présentées à la figure 3. Les images des satellites TIROS (figure 4) et METEOSAT (figure 5) permettent de couvrir les zones côtières. Après correction des températures observées par METEOSAT à l'aide d'un champ de correction atmosphérique estimé à partir des données TIROS et in situ, une carte de synthèse est calculée (figure 6). La zone côtière, mal couverte par les données in situ est en grande partie observée par les satellites qui sont à l'origine, après synthèse d'une carte beaucoup plus précise.

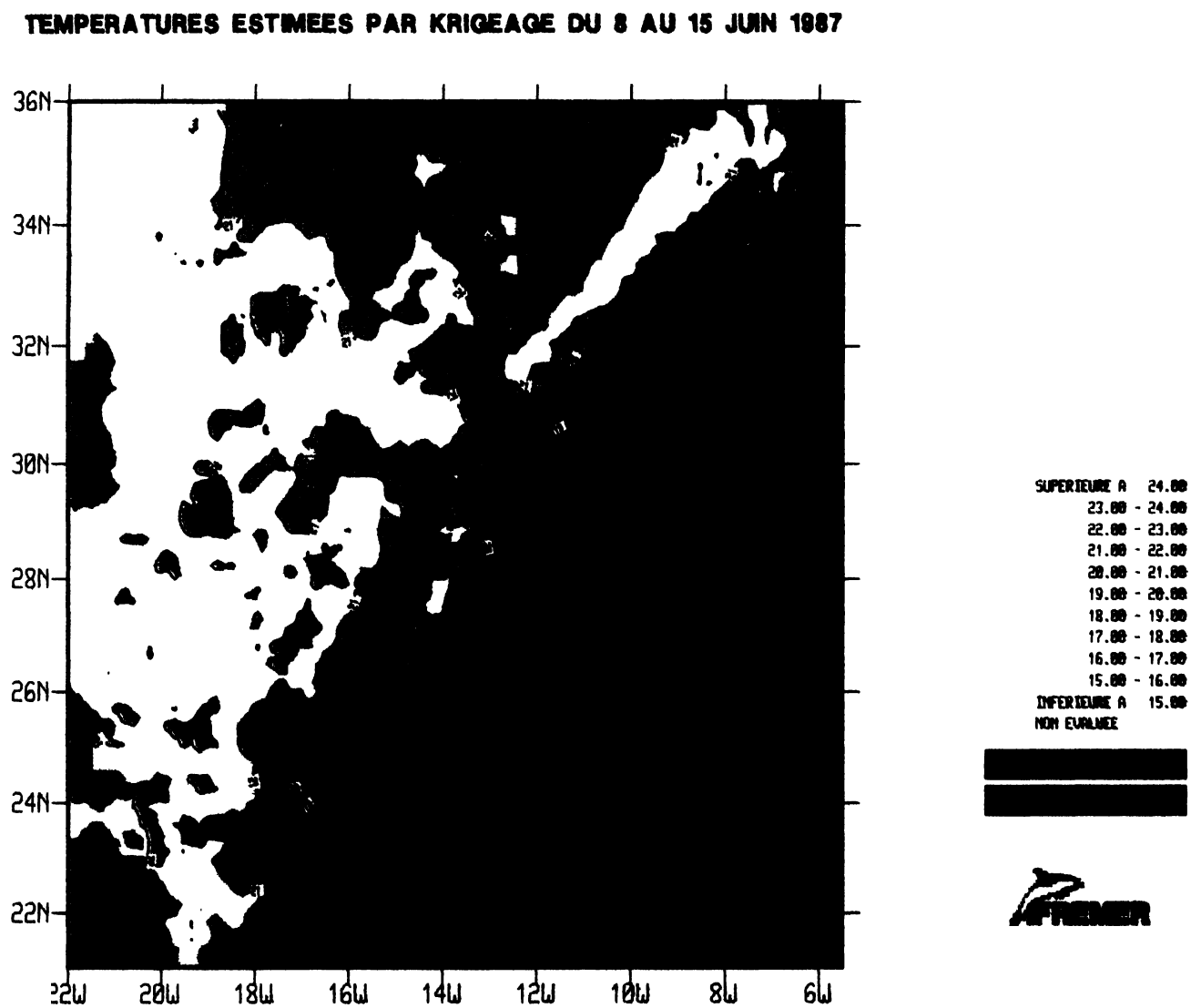


Figure 6 : Carte de synthèse des isothermes de surface de la mer au large des côtes du Nord-Ouest de l'Afrique à partir des donnees METEOSAT à l'aide d'un champ de correction atmosphérique estimé à partir des données TIROS et in situ (ships)

5. Exemples régionaux d'application

5.1.1 Cartes de température de surface de la mer réalisées par le Centre Météorologique Spatial pour l'assistance à la pêche au germon dans l'Atlantique Nord-Est

P. LE BORGNE

I. INTRODUCTION

Le CMS a fourni une assistance operationnelle aux campagnes de peche au Germon au cours des etes 1983, 1984, 1985 et 1986. Cette assistance consistait en l'élaboration et la transmission de cartes qui seront décrites plus loin.

Le CMS est actuellement engage dans un effort de refonte informatique qui concerne egalement les activites de « veille oceanographique ».

L'ete 1987 correspond a une situation de transition qui ne nous a pas permis d'assurer l'assistance habituelle. Les nouveaux outils qui se mettent en place actuellement au CMS seront egalement brievement evoques ci-apres. Apres leur mise en route operationnelle prevue en mai 1988, l'assistance aux campagnes « Germon », pourrait donc reprendre dans de meilleures conditions, si la demande en est faite au CMS.

II. REALISATION ET DIFFUSION DES CARTES

La figure 1 presente un exemple des cartes qui ont ete realisees par le CMS pour les campagnes « Germon ». Elles resultent du traitement par le logiciel « Redres » des donnees du radiometre AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) des satellites de la serie NOAA, reçu en routine au CMS (Brunel et al, 1984). Elles sont etablies manuellement a partir des fils vizir issus du traitement « Redres »; ce sont des documents photographiques representant les champs de temperature de surface de la mer a 1 km de resolution corriges des deformations geometriques induites par le mode de balayage du radiometre. Ils sont calibres en temperature de surface, avec une précision absolue voisine de 0,5°C (Champagne-Philippe, 1983, Castagne et al, 1986).

Ces documents sont analyses quotidiennement par l'equipe « Marine » du CMS, qui realise a la cadence desiree (tous les deux jours pendant la phase de prospection - juin —, 2 fois par semaine ensuite jusqu'a septembre) les syntheses cartographiques des elements, isothermes et fronts thermiques, utiles aux germoniers. Un front sera indique si le gradient thermique local egale ou depasse 1°C sur 5 km.

Divers renseignements (releves BT, messages divers) completent l'information satellitaire. En cas de couverture nuageuse sur la zone, aucune information de surface ne peut être fournies; c'est le principal inconvenient de la teledétection Infrarouge. La transmission aux navires concernés se fait par radio fac-similé.

Notons qu'a côte de cette utilisation en temps reel, des bilans de campagnes germoniere utilisent les syntheses mensuelles produites par le CMS et diffusees via sa revue mensuelle SATMER (Liorzou et al, 1987).

III. PERSPECTIVES

L'utilisation des films vizir, couteuse et impliquant des pointages manuels, donc lourde a mettre en œuvre est remplacee progressivement par l'utilisation de consoles interactives. Une premiere experience d'analyse des champs de temperature de surface sur console interactive a ete tentee au CMS

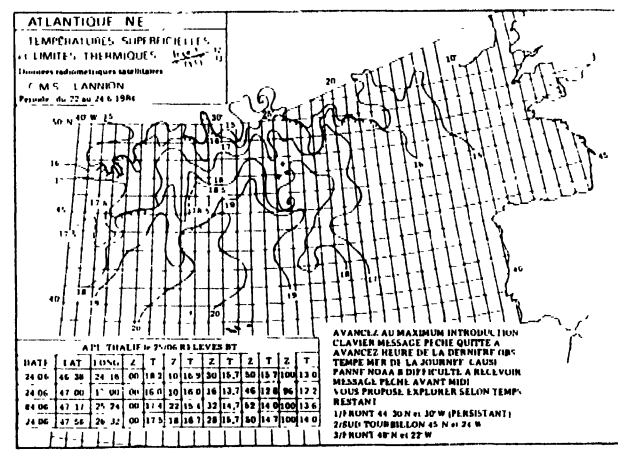


Fig. 1 : exemple de cartes transmises par le CMS aux navires prospecteurs germoniers (campagne 1984)

(Gaillard et al, 1987). Elle est appliquee opérationnellement depuis septembre 1986 a la veille oceanographique sur la Mediterranee. A partir de mai 1988, cette méthode sera generalisee a l'ensemble de la zone d'acquisition de Lannion. En particulier, la zone concernee par la pêche au Germon sera analysee quotidiennement en temps quasi reel sur ecran 1024 × 1024 points a 2 km de résolution.

REFERENCES

BRUNEL (P.), PHULPIN (T.), LE VOURCH (J.), 1984. – Le programme Redres et l'analyse de temperature de la surface de la mer par les thermographies satellitaires. Note de travail EERM n°82.

CASTAGNE (N.), LE BORGNE (P.), LE VOURCH (J.), ORLY (J.P.), 1986. – Operational measurement of Sea Surface Temperatures at CMS Lannion from NOAA-7 AVHRR data. Int. Journ. of Remote Sensing vol 7, n°8.

CHAMPAGNE-PHILIPPE (M.), 1983. – AVHRR : Validation d'un algorithme de correction de SST et restitution de champs sur l'Atlantique N.E. La Meteorologie VIème serie, n° 33.

GAILLARD (O.), LE BORGNE (P.), LE TRAON (P.Y.), LE VOURCH (J.), ORLY (J.P.), 1987. – Utilisation opérationnelle d'une console interactive pour la restitution des champs de temperature de la mer à échelle fine et moyenne; Note de travail EERM n°185.

LIORZOU (B.), LEROY (C.), MASSE (J.), BARBAROUX (O.), 1987. – Campagne germoniere 1986 : Prospections, suivi de la pêche, Teledetection. Rapport IFREMER DRV. 87 003/RH, Nantes.

5.1.2 Pêcherie de germon de l'Atlantique Nord-Est

par C. LEROY
Centre IFREMER - Nantes

Les connaissances acquises à la mer sur le germon de l'Atlantique du NE (2) et concernant les relations constatées entre les rendements des pêches et les structures thermiques remarquables ont permis d'utiliser directement l'outil télédétection infrarouge.

On sait que vers le mois de juin les jeunes germons migrent vers les régions tempérées à la recherche de leur nourriture. On les rencontre sous nos latitudes en surface ou subsurface dans les eaux dont la température en surface est approximativement comprise entre 16 et 20°C. A l'intérieur de cet intervalle, les rassemblements de poissons sous forme de bancs sont préférentiellement rencontrés dans le voisinage de gradients thermiques. En général, les germons sont pêchés du côté le plus chaud du gradient mais pas necessairement à proximité immédiate. A ces discontinuités thermiques correspondent souvent des discontinuites de couleur de l'eau, les eaux les plus chaudes etant bleues et les eaux les plus froides étant vertes. On notera que des contacts entre eaux bleues et eaux vertes ont été détectés par satellite dans l'Océan Pacifique sans qu'il y ait trace de gradient thermique (7). Plus que la temperature qui nécessite un instrument, cette différence de couleur est utilisée par les professionnels comme critère de choix sur les zones supposees favorables à la pêche. Dans ces conditions, on conçoit l'interêt qu'il y aurait à disposer d'un capteur couleur opérationnel.

Depuis le courant de l'été 1983, le CMS élabore des cartes de température de surface à partir de données AVHRR (1, 3 et 4). Depuis 1984, une collaboration s'est établie entre le CMS et l'IFREMER afin de définir la forme et le contenu des données transmises par radio fac-similé en vue de leur application à la pêche au germon (6, 8, 9, 11, 12, 14). Afin de connaître rapidement l'impact des données transmises aux bateaux, nous avons utilisé le système ARGOS en installant des balises sur les germoniers désignés pour effectuer la prospection des zones de pêches. A cette occasion, nous avons utilisé un ensemble émetteur constitué par une balise connectée à un microcalculateur permettant d'entrer les données (pêche, océanographie, météorologie) en mode conversationnel, facilement utilisable par un patron de pêche (10).

En 1986 (13), nous avons tenté sur 3 mois une expérience visant à recueillir au jour le jour les pêches effectuées par l'ensemble de la flottille afin d'évaluer l'impact éventuel des renseignements transmis sur la position des fronts thermiques.

Malgré des difficultés liees a la couverture nuageuse qui gêne les mesures radiométriques et à la faible mobilité de la flottille en regard des zones de gradients thermiques supposées favorables qui lui sont indiquées, nous avons tenté de relier les pêches effectuées à la presence de gradients thermiques. A cette fin, nous avons reporté les pêches moyennes dans des pavés de 20 minutes de latitude par 30 minutes de longitude sur les cartes bi-hebdomadaires de température de surface et sur les cartes mensuelles de fronts thermiques.

On notera d'une part que l'absence de gradient sur ces cartes ne signifie pas forcément absence de gradient qui peut être cache par les nuages et d'autre part, que seule la présence d'un pave indique s'il y a eu action de pêche, avec ou sans prises. Il n'y a donc pas d'observations collectées en dehors des zones carroyées.

Les représentations bi-hebdomadaires (figure 1) par une résolution assez fine ont l'avantage de bien mettre en valeur les concordances spatio-temporelles lorsqu'elles existent. Par contre, le petit nombre d'observations ne permet pas d'avoir une vision d'ensemble.

Au contraire, les cartes mensuelles de fronts qui donnent une bonne vision d'ensemble ne permettent pas d'obtenir un ajustement spatio-temporel des observations. Seuls les fronts sont indiqués et il est nécessaire de se reporter aux températures moyennes mensuelles de surface afin d'évaluer si les fronts sont situes dans l'intervalle de temperature compris entre 16 et 20°C (à l'approximation pres de l'évolution de la temperature au cours du mois). La figure montre que les principales pêches réalisées en août 1986 sont disposées dans un triangle, limité d'une part au NE par les accores et le front associé et d'autre part à l'ouest par un autre front, orienté nord-sud et situé vers 12°W. On notera la presence de fronts situés plus à l'ouest, mais sur la productivité desquels on ne sait rien.

Les experiences d'utilisation de la télédétection menées au cours des campagnes de pêche de 1984 à 1986, n'ont pas pu être reconduites en 1987, le CMS n'étant pas en mesure de produire les cartes habituelles cette année là et le réseau fac-similé français étant interrompu. Néanmoins, nous avons suivi, a posteriori, l'évolution de la pêche, en reportant les captures réalisées par la flottille sur des cartes de température de surface, obtenues par krigeage (5), en tenant compte des températures relevées par les navires marchands et des données radiométriques AVHRR acquises au CMS.

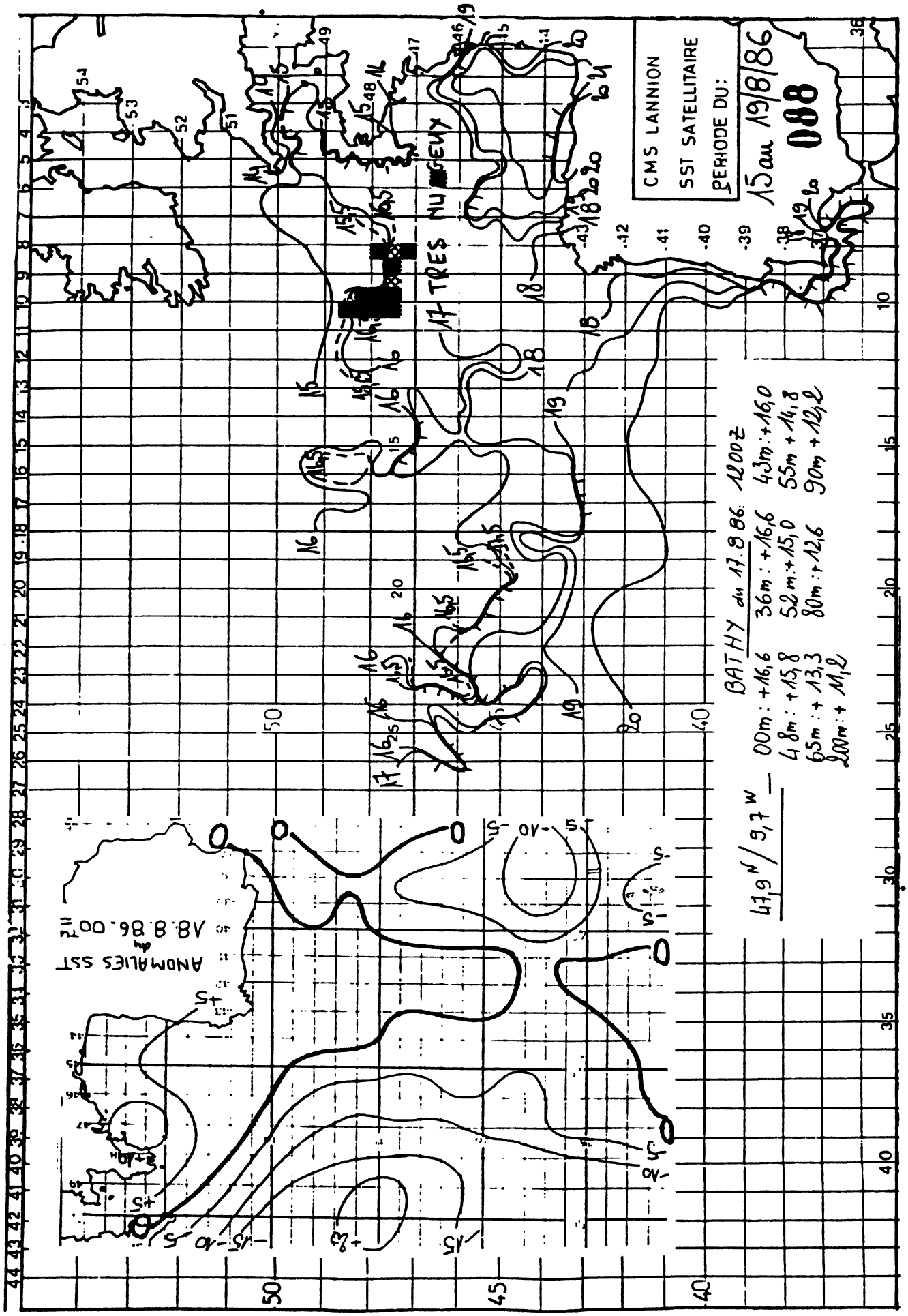


Fig. 1. — Exemple de document (source : Météorologie nationale) transmis par fac-simile. Les captures de germon ont été reportées ultérieurement sur la carte des isothermes superficielles. Ce document représente la meilleure coïncidence pêche/front observée durant la saison 1986.

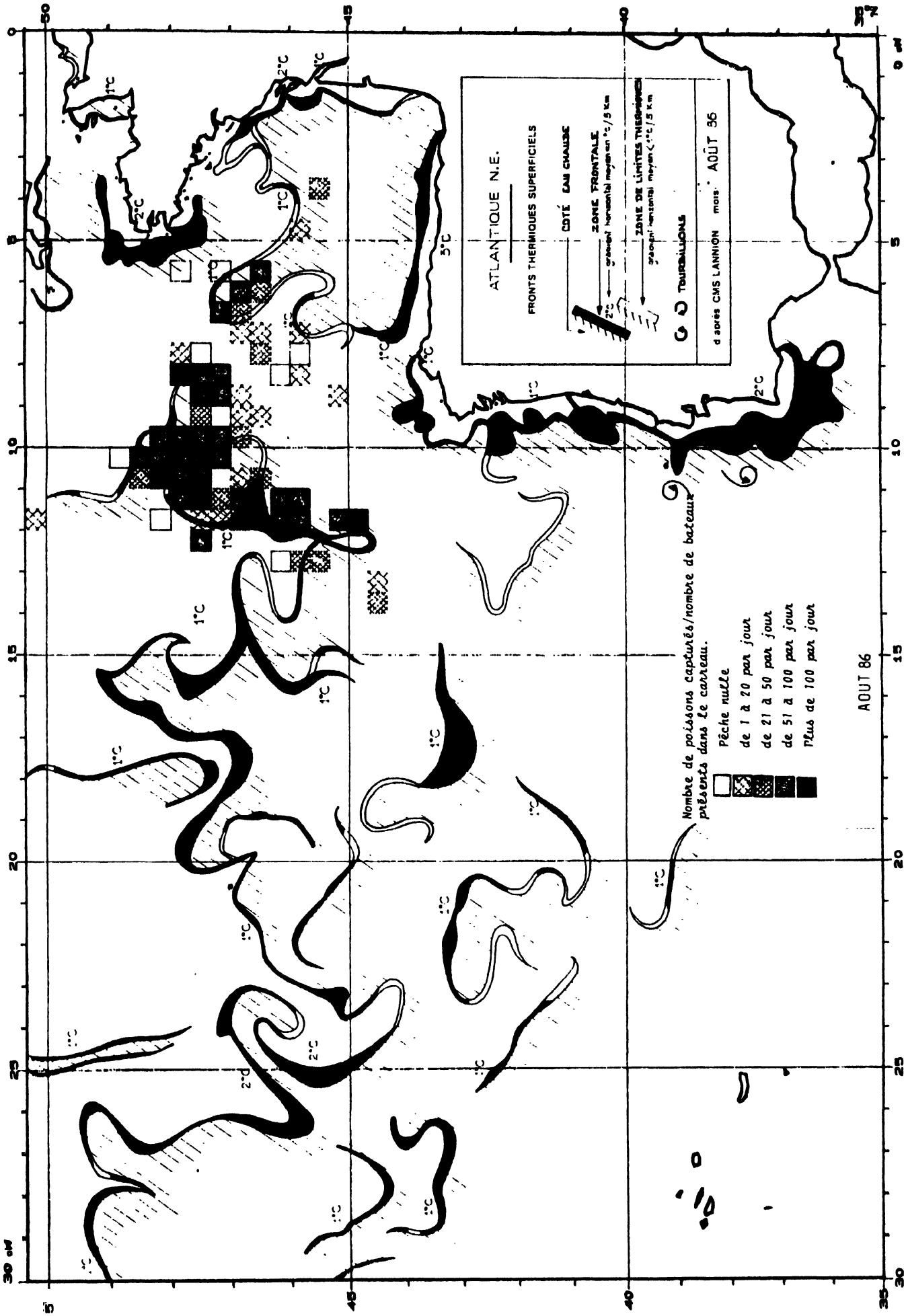


Fig. 2. — Répartition géographique des fronts thermiques (d'apres document Méteorologie nationale) et des pêches de germon (flottille française) en août 1986.

La figure 3 donne un exemple de document obtenu par cette procédure qui permet d'obtenir un champ thermique assez complet, notamment sous les nuages. Cependant, les gradients thermiques superficiels sont lissés et n'apparaissent plus sur le document final.

De ces trois années d'experience, nous pouvons tirer les conclusions provisoires suivantes :

1) La couverture nuageuse qui empêche les observations radiométriques représente une gêne sérieuse qu'il ne faut pas toutefois surestimer, car les fronts qui sont productifs sont ceux qui sont persistants et qui ont donc plus de chance d'être détectés dans les fenêtres internuageuses mobiles.

2) En ce qui concerne les problèmes de prospection (utilisation de bateaux qui recherchent le poisson en dehors de la flottille), on a toujours intérêt, en l'absence d'autres données, à aller explorer les discontinuités thermiques.

3) En ce qui concerne l'utilisation directe des données de télédétection par la flottille (en l'absence de bateaux prospecteurs), on se heurte à deux problèmes. D'une part, les pêcheurs paraissent peu enclins à se déplacer pour aller explorer des structures frontales supposées favorables même si elles ne sont pas éloignées. D'autre part, les résultats de pêches collectés sont insuffisamment nombreux et des recoupements nous permettent d'estimer que dans certains cas, ils peuvent être inexacts. Nous ne disposons donc que de peu de données fines sur lesquelles nous pouvons comparer simultanément pêche et gradient thermique. Il est donc difficile d'établir une stratégie d'utilisation des données thermiques satellitaires qui serait fondée sur l'expérience acquise à l'occasion de vérifications de l'intérêt de zones supposées favorables à la pêche.

La pêche du germon en France subit actuellement une importante mutation. La pêche aux lignes traînantes va probablement disparaître, à court terme, pour être remplacée par la pêche au filet maillant ou le chalutage en bœufs (à deux bateaux). L'utilisation de la télédétection satellitaire, en support de ces techniques de pêche, impliquerait d'améliorer nos connaissances dans les relations entre les structures thermiques superficielles et la distribution des germons en profondeur.

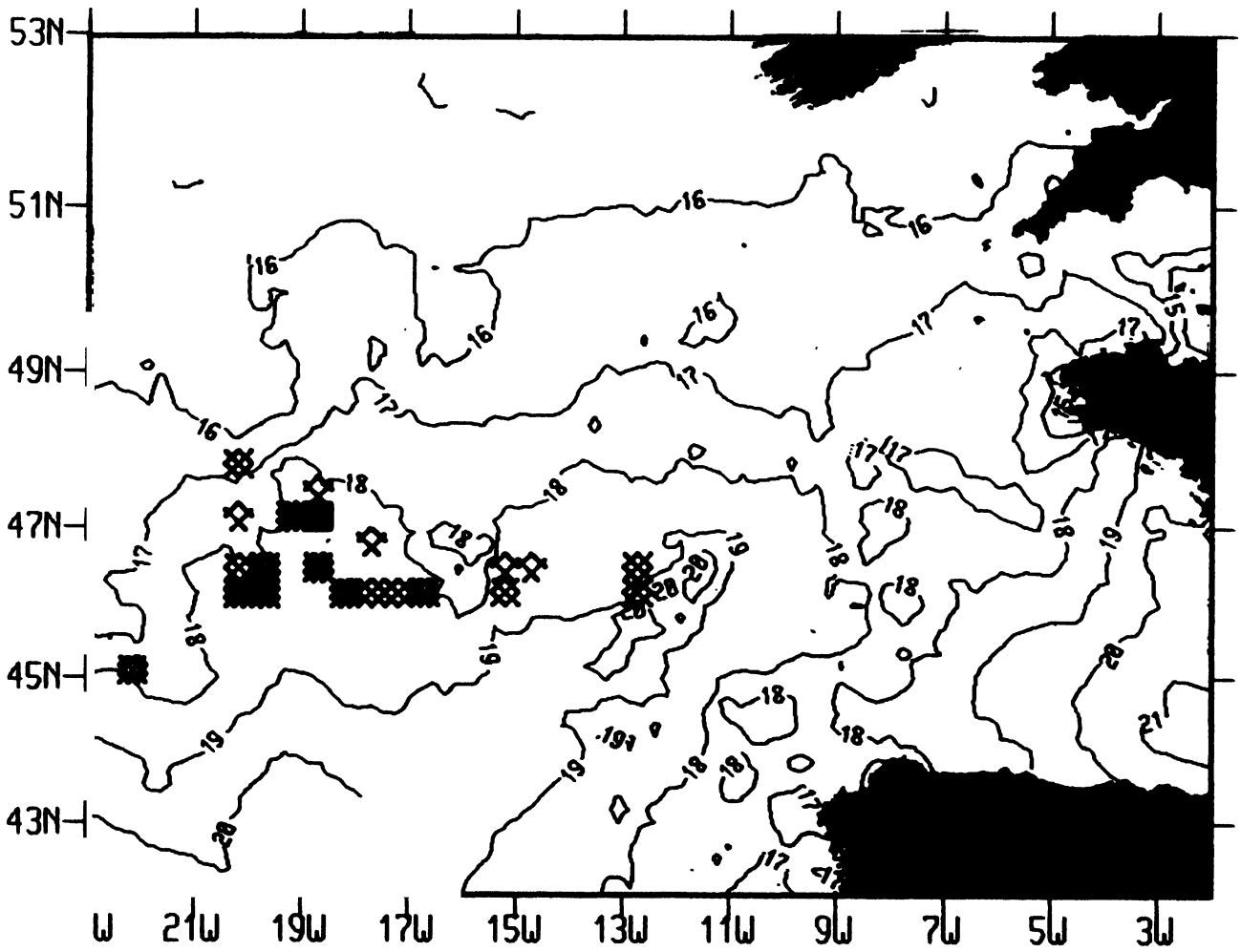


Fig. 3. — Période du 8 au 15 juillet 1987, température estimee par krigeage (données satellites et bateaux) et pêches effectuees. Les hachures sont d'autant plus serrées que les pêches moyennes sont importantes.

REFERENCES

(1) Anonyme, 1983... — Bulletin mensuel de renseignements océanographiques obtenus a partir de mesures satellitaires météorologiques sur la Méditerranée et l'Atlantique nord-est. SATMER Météorologie nationale, CMS-Lannion.

(2) ALONCLE (H.) et DELAPORTE (F.), 1973. — Données nouvelles sur le germon *Thunnus alalunga* Bonnaterre 1788 dans le Nord-Est Atlantique. Rev. Trav. Inst. Pêches marit. 37 (4) : 475, 572.

(3) CASTAGNE (N.), LE BORGNE (P.), LE VOURCH (J.) et OLRY (J.P.), 1985. — Restitution operationnelle de la température de surface au CMS à partir de l'AVHRR de NOAA-7. Note de trav. de l'EERM, 128, Météorol. Nat.

(4) CASTAGNE (N.), LE BORGNE (P.), LE VOURCHE (J.) et OLRY (J.P.), 1986. — Operationnel measurement of sea surface temperatures at CMS Lannion from NOAA-7 AVHRR data. Int. J. Remote sensing, 7, 8 : 953-984.

(5) GOHIN (F.), 1987. — Analyse geostatistique des champs thermiques de la surface de la mer. These doct. ing., Ecole des Mines, Paris.

(6) GUENNEGAN (Y.), 1985. — Prospection germoniere, zone traditionnelle, 2ème maree. Rapport non publie, IFREMER/DERO/AT, Brest.

(7) LAURS (R.M.), FIEDLER (P.C.) and MONTGOMERY (D.R.), 1984. — Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. Deep Sea Res., 31,9 : 1085-1099.

(8) LE GALL (J.Y.), 1983. — Le satellite NOAA-7 et la flottille thoniere germoniere dans le nord-est Atlantique : temperature de surface et système Argos. La Pêche maritime, 1265 : 441-446.

(9) LEROY (C.), 1984. — Pêche et thermographie de surface. Experience d'aide a la prospection germonière. Met. Mar. « Marins et Météorologie », spec. 124 bis : 31,34.

(10) LEROY (C.), DINTHEER (C.) et HERBLAND (A.), 1986. — Applications halieutiques du systeme Argos. Mésogée (Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille) 46 (2) : 95-103.

(11) LIORZOU (B.) et LEROY (C.), 1984. — Premiere campagne de prospection germoniere, juin 1984. Rapport non publie, IFREMER/DRV/RH, Nantes.

(12) LIORZOU (B.), LEROY (C.) et MASSE (J.), 1985. — Prospection germoniere 1985. Premieres marées, grand ouest, zone traditionnelle. Remarques sur l'aide a la pêche germoniere. Rapport non publié, IFREMER/DRV/RH, Nantes.

(13) LIORZOU (B.), LEROY (C.), MASSE (J.) et BARBAROUX (O.), 1987. — Campagne germoniere 1986, prospections, suivi de la pêche, télédétection. Rapport IFREMER, DRV.87.003/RH, Nantes.

(14) LITTAYE (A.), 1985. — Prospection germonière. Zone grand ouest, 2ème marée 16 juillet-20 août 1985. Rapport non publie, IFREMER/DRV/RH, Nantes.

CMS : Centre de meteorologie spatiale.
AVHRR : Advanced very high resolution radiometer.

5.2. Applications de la télédétection satellitaire du germon du Pacifique Nord, *Thunnus alalunga (Bonnaterre)*

R. Michaël LAURS
South West Fisheries Center,
National Marine Fisheries Service, NOAA
La Jolla, C.A. 92038 (USA)

Introduction

Durant les années récentes, la télédétection satellitaire est demeurée une source importante d'information océanographique utilisée par les biologistes et océanographes des pêcheries dans le domaine des recherches sur le germon et par les pêcheurs U.S. pour le développement des stratégies de pêche au germon dans le Pacifique Nord. Il n'est pas possible d'utiliser les satellites pour détecter directement les bancs de germon ni de mesurer ou collecter à partir de l'espace le spectre complet d'information nécessaire pour apprécier les

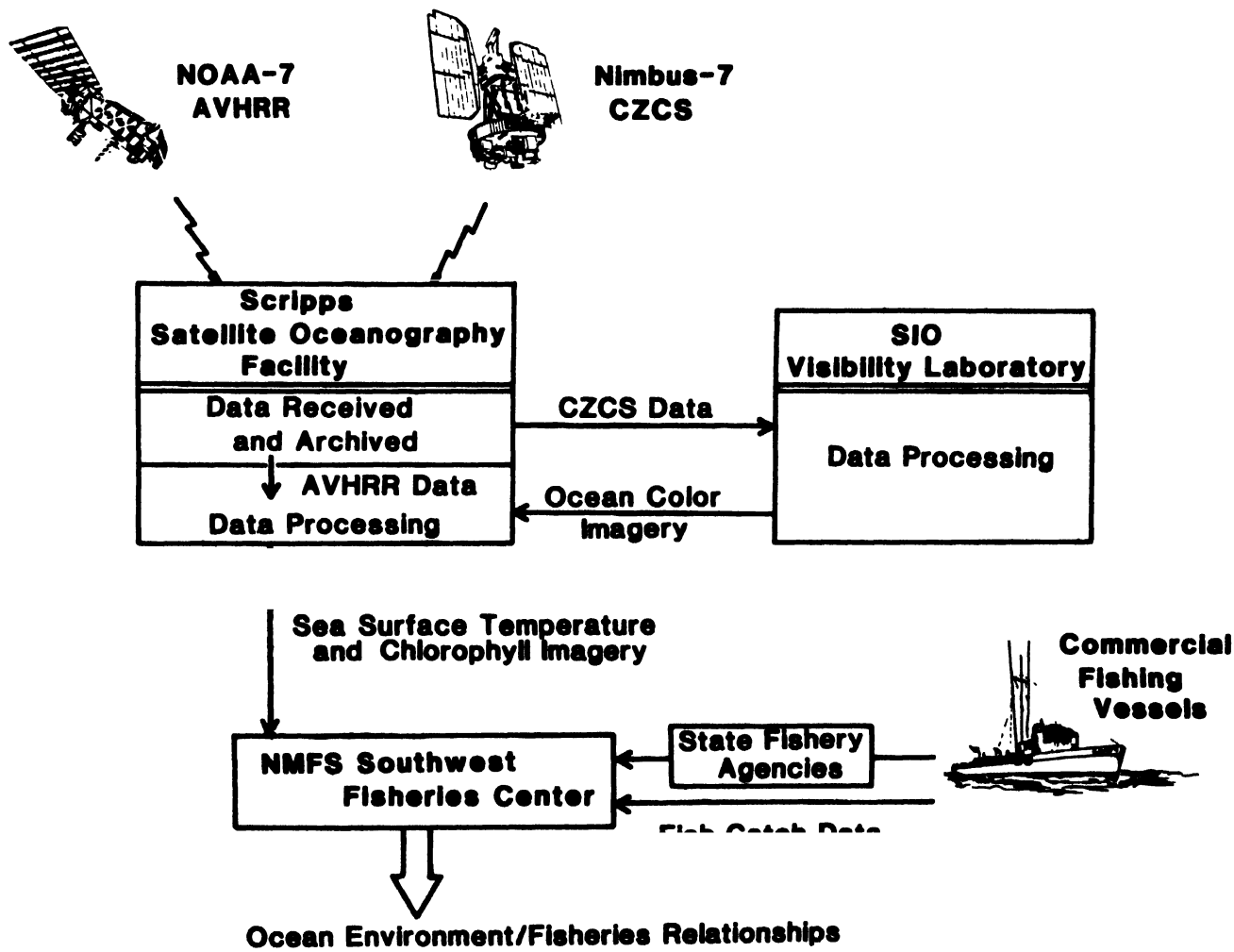


Figure 1 : Reseau de collecte et traitement des donnees utilise par le National Marine Fisheries Service, South West Fisheries Center sur la côte ouest des USA (adapté de Laurs *et al.*, 1984)

modifications de l'environnement marin qui affectent le germon. Néanmoins les processus océanographiques clés et les conditions qui peuvent influencer la distribution, la disponibilité et la vulnérabilité du germon peuvent être déduits des mesures faites à partir des satellites, comme par exemple les limites des fronts océaniques, les grandes structures des courants et de la circulation océanique, les remontées d'eau (up-welling) côtières, la concentration en pigment chlorophyllien, la distribution de la température de surface (SST). Les mesures de température superficielle obtenues à partir des relevées infra-rouges par les satellites défilants à orbite polaire NOAA, les mesures de la couleur de l'océan par le scanner couleur en zone côtière (CZCS) du satellite NIMBUS-7 ont été largement utilisés en relation avec la connaissance et l'exploitation du germon du Pacifique Nord. De plus, les mesures de champs de vent faites par le dispersiomètre de SEASAT ont été récemment utilisées dans des analyses de pêcheries incluant le germon de cette zone.

Application de la télédétection satellitaire à la recherche sur le germon du Pacifique Nord

La télédétection satellitaire a démontré sa qualité en tant qu'outil pour la recherche sur le germon du Pacifique Nord. Ceci a été particulièrement vrai dans les études dévolues à la distribution, la capturabilité et la vulnérabilité en relation avec les conditions et les processus océanographiques.

Laurs *et al.* (1984) ont démontré que les caractéristiques environnementales appréciées par l'infrarouge et les images en couleur de la surface de la mer définissent les frontières pour les aggrégations de germon et les zones de pêche telles qu'elles apparaissent par les enregistrements de pêche commerciale. Cette étude a été menée grâce à un réseau concourant d'information et de données satellitaires et de pêche. Ce réseau, dont un schéma est donné à la figure 1, nécessite la coopération entre le chercheur sur les pêcheries, des agences fédérales et des états, les structures de réception et de traitement des données satellitaires, et l'industrie germonière U.S.

La radiométrie AVHRR à haute résolution et le scanner CZCS pour la couleur des zones côtières, sont reçus directement des satellites NOAA-7 et NIMBUS-7, respectivement à la Scripps Institution of Oceanography - Satellite Oceanography Facility (SSOF). Les données du satellite lors de son passage au-dessus des eaux côtières au large de la Californie, et couvrant une région au large des états Orégon et Washington (Figure 2), ont été obtenues durant les périodes de pêche intensive par la flottille germonière U.S.

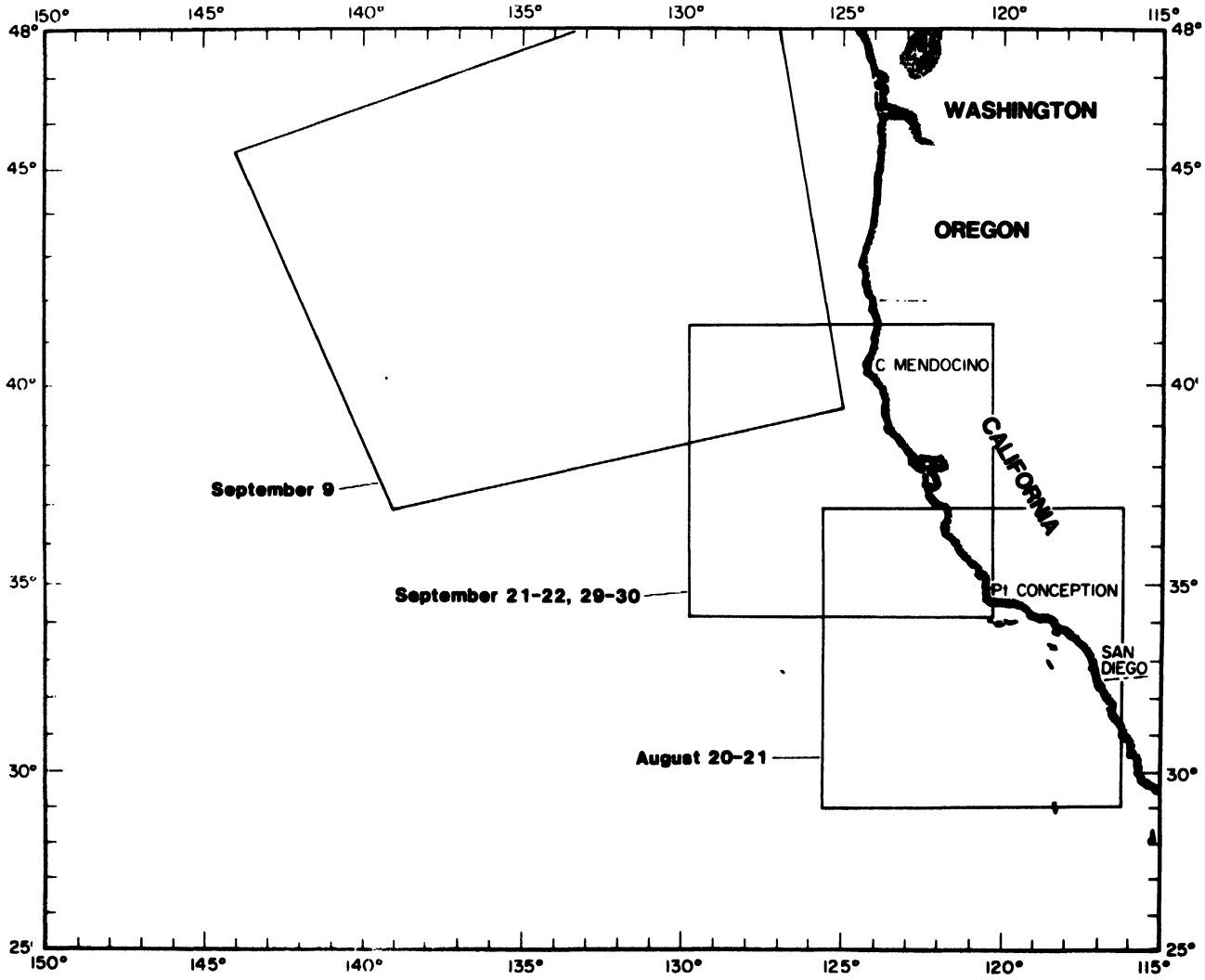


Figure 2 : Localisation des images pour la recherche de la distribution des captures en relation avec les caracteristiques de l'environnement observées à partir des satellites (from Laurs *et al.*, 1984).

Les valeurs de radiance du canal 4 (10,5 à 11,3 nannomètres) et du canal 5 (11,5 à 12,5 nannomètres) sont converties en valeur de température en utilisant une calibration disponible à la SSOF, développée par Lauritson *et al.* (1979). Les températures de surface SST, corrigées des effets atmosphériques, sont estimées en utilisant un algorithme multi-canaux développé par Mc Clain *et al.* (1983). Les images de température de surface SST sont recalées par des points de référence au sol de telle façon que les images de SST et de couleur soient identiques.

Les radiances de la bande 1 (blanc) et de la bande 3 (verte) issues du CZCS sont corrigées de l'effet Rayleigh et de la dispersion sur l'aerosol par un algorithme atmosphérique, modifié par Smith et Wilson (1981), d'une version produite par l'équipe experimentale de CZCS de NIMBUS. Le rapport bleu/vert est converti en indice de concentration phytoplanctonique en utilisant un algorithme pigmentaire dû à Clark (1981). Les dimensions des pixels des images côtières et du large de CZCS sont de 1,6 et 2,4 km respectivement.

Les donnees de capture de germon sont obtenues a partir des carnets de pêche quotidiens fournis volontairement par les pêcheurs. Les positions ont le plus souvent été enregistrées au début de chaque journée de pêche, qui se développe sur pres de 50 km. Les captures sont standardisées pour un effort de 150 heures de ligne, représentant une journée de pêche standard d'un ligneur americain. Les captures par unite d'effort (C.P.U.E.) pour des périodes de deux journées précédent à deux journées suivant le passage du satellite ont été réparties sur les images de température et de teneur en pigment pour les zones côtières. Les données de capture pour les zones au large ont été moyennées par carré de 1° pour une periode de 15 jours et reportées sur les images satellitaires.

Les images satellitaires et les captures données de pêche concourantes (Figures 3 à 10) montrent clairement que les images thermiques infra-rouge et les données de couleur dans le visible, permettent de définir les limites environnementales de la distribution spatiale des aggrégations de germon, de façon plus efficace que ne le permettent les observations à partir de navires ou d'avion. L'etude démontre de façon convaincante que la distribution et la disponibilité du germon

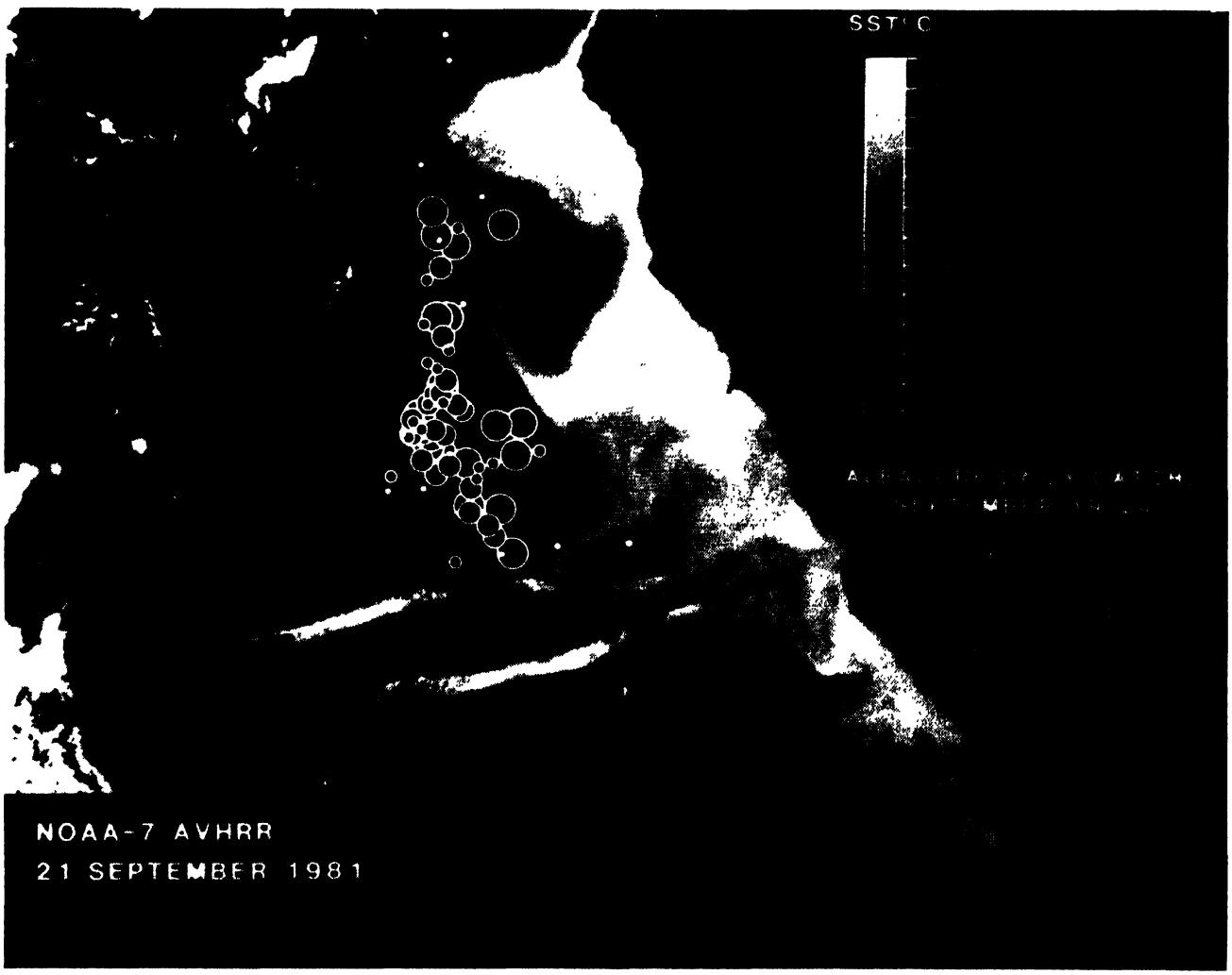


Figure 3 : Captures quotidiennes de germon realisees du 19 au 24 septembre 1981 au large de la Californie en surimposition de la temperature de surface issues des donnees satellitaires du 22 septembre 1981, 10403PST (adapte de Laurs *et al.*, 1984)

au large de la côte ouest des U.S.A. sont directement reliées aux fronts oceaniques associes aux remontées dûes aux up-wellings côtiers (Figures 3 à 8). Les concentrations de germon exploitables commercialement sont situees dans les eaux chaudes, les eaux océaniques bleues situées pres des fronts thermiques et colorés sur la bordure à la côte des masses oceaniques. Des fronts relativement intenses sont très propices et les intrusions, en direction de la côte, d'eau océanique chaude claire particulièrement favorables a la présence de bancs de germons.

L'étude montre aussi que dans des masses d'eau situées a des centaines de milles au large à la fin de l'été, des concentrations commerciales de germon sont associées à des zones frontales océaniques détectables à partir des images « couleurs » satellitaires, sans gradient thermique.

La disponibilité de germon dans les eaux du large semble plus élevée dans des eaux de relativement plus forte production. Laurs et Lynn (1977) ont montré que la migration du germon dans les eaux côtières nord-américaines est associée à la zone de transition du Pacifique Nord et ses zones frontales, qui montrent de très forts gradients thermiques SST durant les mois de printemps. Le réchauffement saisonnier et la diminution de mélange par le vent, sans aucun doute, joue un rôle dans l'absence totale de gradient thermique associé au front de couleurs à la fin de l'été.

La distribution du germon durant l'hiver dans les zones situées à quelques centaines de milles au large de la côte américaine ouest est aussi reliée aux fronts thermiques, qui paraissent marquer la frontière extérieure du Courant de Californie, observées par l'imagerie AVHRR (Laurs *et al.*, 1981).

Jurick (1985) a étudié les relations entre les captures commerciales de germon et les analyses de frontière thermique distribuées aux pêcheurs américains. Son étude portait sur les mois de juillet jusqu'à octobre pour les années 1976 à 1978. Il utiliait des données de captures obtenues à partir des carnets de pêche (Laurs *et al.*, 1975), standardisées selon la méthode exposée par Laurs *et al.* (1976), et moyennées pour donner une capture moyenne par jour et par bateau pour un carré de 1°. Une information supplémentaire sur le rendement de la pêche au germon est obtenue à partir des bulletins sur la pêche au germon produits par quinzaine par le National Marine Fisheries Service (NMFS) (Laurs, 1977). Les cartes d'analyse des zones frontales, qui étaient obtenues sur une base hebdomadaire, sont produites à partir de l'imagerie VHRR telle que décrite par Breaker (1981) et distribuées par la NOAA/National Environmental Satellite Service.

Jurick (1985) a montré que dans 70 % des cas, les captures étaient plus fortes dans les quadrangles contenant une ou plusieurs zones frontales/frontières définies par l'imagerie satellite que dans les autres quadrangles. Les plus fortes captures en moyenne sont situées à 70 % dans les quadrangles contenant de larges frontières thermiques, 33 % dans les quadrangles à faible frontière thermique, 25 % dans les quadrangles à forte frontière thermique.

Jurick considère que les plus fortes captures sont plus souvent associées aux larges frontières thermiques qu'aux fortes frontières thermiques en raison du laps de temps nécessaire, après le développement d'une nouvelle forte zone frontale, pour l'aggrégation des organismes fourrage devant conduire à une zone favorable d'alimentation du germon.

Par ailleurs, Jurick a montré que 83 % des zones les plus productrices durant les saisons de pêche au germon étudiées étaient associées à des structures thermiques décrites dans les analyses de zone frontière : 48 % des cas se produisirent après que des cartes aient été distribuees, et pourraient avoir été préditées à partir des cartes distribuées. Finalement, l'analyse statistique a montré que 7 des 8 périodes testées ont montré une localisation de zone de pêche significativement plus efficace lorsqu'il y a eu utilisation des zones thermiques frontieres. Jurick conclut que les zones frontières thermiques déduites de l'analyse satellitaire constituent un outil de haute qualité pour l'identification des aires de pêcherie potentielle de germon.

Svejkovsky (1988) a utilisé l'imagerie satellitaire NOAA AVHRR et les données de CPUE de germon pour analyser les causes possibles d'aggregation au large de la Californie. Le traitement d'image satellitaire a été utilise par Svejkovsky pour estimer les caractéristiques thermiques superficielles et les taux de dissipation ou d'intensification des fronts thermiques. En pratique, une serie d'images AVHRR portant généralement sur 6 à 7 jours ont ete calibrées, lissees à l'aide d'un filtre a moyenne mobile, rectifiées géométriquement, et dépouillées de l'influence des nuages par l'application d'un masque spécifique. Une approximation dérivée spatiale a été calculée pour chaque image et l'image « gradient » résultant filtrée pour en éliminer tous les gradients de valeur inférieure à 0,1°/km. En utilisant ces procédures Svejkovsky a pu analyser qualitativement et quantitativement les fronts thermiques superficiels SST, et en notant les changements des structures frontales sur les images successives, décrire les variations des positions et de l'intensité des zones frontales dans le temps et l'espace.

Les variations dans le succès des pêches au germon ont été analysées par Svejkovsky (1988) à partir des carnets de pêche (Laurs *et al.*, 1975). Les données de pêche ont été standardisées en valeurs de rendement (CPUE) journaliers exprimés comme le nombre de germons capturés pour 150 heures de ligneur par degré de 1°. Les moyennes des rendements CPUE pour 7 jours ont été calculées pour chaque quadrangle de 1° latitude/longitude au large de la Californie pour les saisons de pêche au germon de 1980 à 1983.

L'examen de ces valeurs de rendement de pêche (CPUE) montre l'existence de différents types ou situations reliées aux variations dans la structure du front océanique telle qu'elle peut être appréciée à l'aide du radiomètre AVHRR. La plupart des zones pêchées montrent de fréquentes fluctuations du rendement de pêche autour de la moyenne. Occasionnellement, une zone peut montrer un accroissement abrupt des captures qui sera suivi par un effondrement également brusque. Ce dernier type de comportement a été associé à une présence stable et persistante des fronts thermiques. Les bonnes pêches semblent maintenues stables dans ces zones jusqu'à plusieurs semaines, puis peuvent tomber très rapidement si les frontières thermiques sont

détruites par un changement du régime des vents. Ces résultats corroborent ceux obtenus par les marquages acoustiques et suivis des germons (Laurs *et al.*, 1976) qui ont montré que les germons demeurent à proximité des frontières associées aux up-welling au large de la Californie centrale, mais migrent très rapidement au large de cette zone quand cette frontière est détruite par des changements ou translations du régime des vents, changements défavorables à l'installation de remontées d'eau profondes.

Svejkovsky a également montré que les bons rendements de pêche ne sont pas toujours associés aux zones à fort gradient thermique. Ceci est particulièrement évident quand les structures frontales persistantes bien établies, sont remplacées par des frontières nouvelles intenses formées par des modifications du régime des vents. Les rendements CPUE sont réduits de 50 % ou plus de ce qu'ils étaient avant la rupture et destruction de l'ancienne structure, bien que des structures thermiques fortes nouvelles soient formées par le nouveau régime et exploitées intensément par la flottille.

Svejkovsky suppose que les conditions nécessaires à l'établissement d'un environnement favorable (alimentaire notamment) a la concentration du germon peuvent être réalisées à proximité de structures thermiques stables persistantes, mais pas dans les zones où un front vient d'être récemment établi. Son étude démontre clairement que des modifications soudaines dans l'agrégation des germons sont révélatrices de processus dynamiques ayant affecté la stabilité de structures frontales dans la température de surface.

Laurs (en préparation) a utilisé des images AVHRR et CZCS en conjection avec le marquage acoustique et des observations océanographiques concourantes pour analyser les mécanismes possibles responsables de l'agrégation du germon à proximité des frontières des up-welling côtiers. Il apparait que l'agregation des germons dans la rive chaude, océanique claire des up-welling et l'évitement des zones d'eaux a haute productivité et haute densité de proies sur la rive gauche, turbide, ascensionnelle par les germons est déterminée par la clarté de l'eau. Les résultats suggèrent que la clarté de l'eau détermine la possibilité et la capacité de vision et détection des proies, plus que les conditions thermiques, et constitue le facteur environnemental déterminant la distribution du germon dans les zones d'up-welling côtiers.

Un cas d'étude des variations du rendement de la

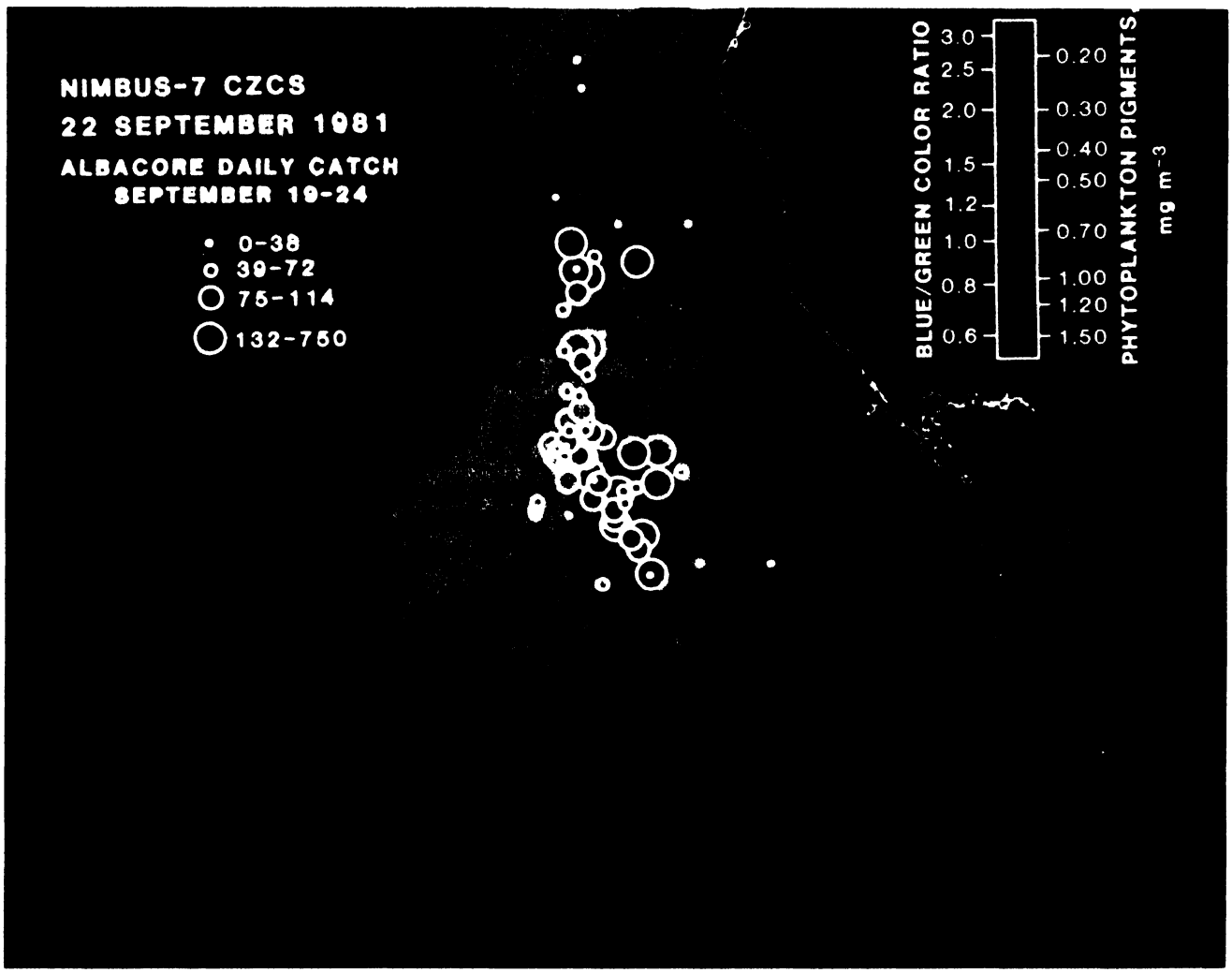


Figure 4 : Captures quotidiennes de germon du 19 au 24 septembre 1981 au large de la Californie en surimposition des images du CZCS de NIMBUS-7; rapport bleu/vert et indice de concentration phytoplanctonique, 22 septembre 1981, 1104 PST (adapte de Laurs *et al.*, 1984)

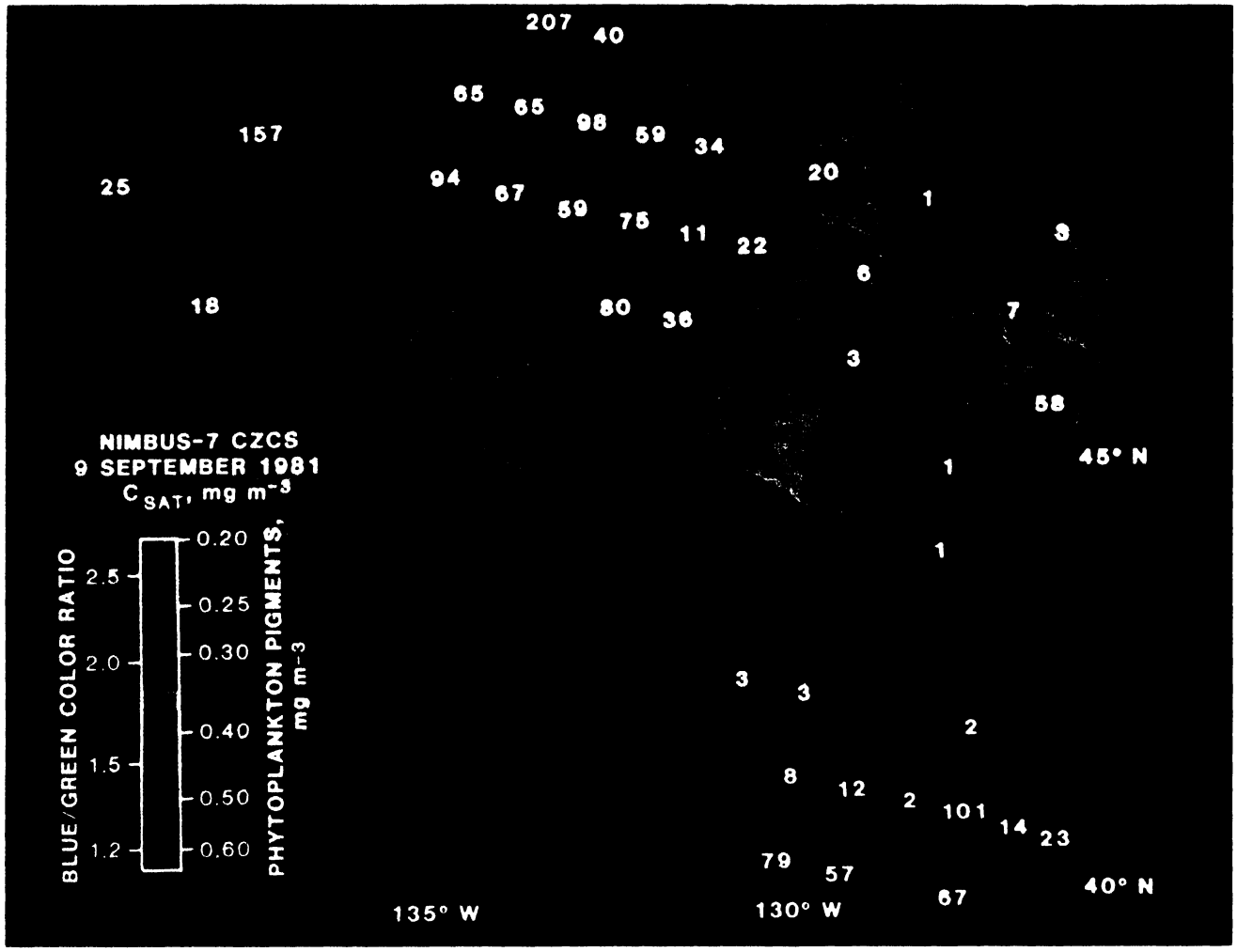


Figure 5 : Captures moyennes quotidiennes de germon par carre de 1° du 1 au 15 septembre 1981 en surimposition des images du CZCS de NIMBUS-7 : rapport bleu/vert et indice de concentration phytoplanctonique, 9 septembre 1981, 1215 PST (adapte de Laurs *et al.*, 1984)

pêche nord-américaine au germon et de son habitat en liaison avec les caractéristiques océanographiques et hydro-climatiques mesurées par les capteurs satellitaires : infra-rouge, dispersiomètre, alimètre est en cours de progrès par Laurs, Svejkovsky et Hess (en cours). Cette étude est en cours de réalisation pour évaluer l'intérêt des mesures réalisées par les capteurs actifs (altimétriques, dispersiométriques) sur l'état de surface de la mer et des champs de vent, en addition des mesures infra-rouges de la température de la mer, pour détecter et mesurer en permanence les conditions océanographiques qui affectent l'écologie et la pêche du germon. Cette information est particulièrement abondante, volumineuse et importante, en raison du fait qu'un énorme volume de données de ce type deviendront disponibles en routine sur l'ensemble de l'océan mondial avec le lancement de nombreux vecteurs et capteurs météorologiques actifs durant la décade à venir. Les données résultantes devraient apporter d'énormes capacités de mesure et de surveillance des caractéristiques de l'environnement marin qui jouent un rôle déterminant dans la répartition, les migrations et les conditions de pêche de poissons hautement migratoires. Les données des dispersiomètres et des altimètres peuvent être particulièrement utiles dans les parties centrales des océans où l'information océanographique est généralement manquante sur la base spatiale et temporelle nécessaire pour la recherche et les applications à la pêche.

L'étude utilise les données du dispersiomètre (SASS) et de l'altimètre du satellite SEASAT et des images infra-rouges VHRR de NOMA5, et les données de pêche (CPUE) du germon de la même période. Les résultats préliminaires montrent une bonne correspondance entre la pêche au germon et les types de convergence et divergence océaniques issus du dispersiomètre SASS, notamment l'intensité des champs de vent moyennées sur des périodes de 7 jours.

Application de la télédétection satellitaire à l'exploitation du germon du Pacifique Nord par les pêcheurs americains U.S.

Les pêcheurs U.S. de germon utilisent largement les produits issus de l'imagerie satellitaire pour déterminer les zones favorables à la concentration des poissons et pour la sécurité des navires. Ils ont été parmi les premiers pêcheurs à reconnaître l'intérêt de la télédétec-

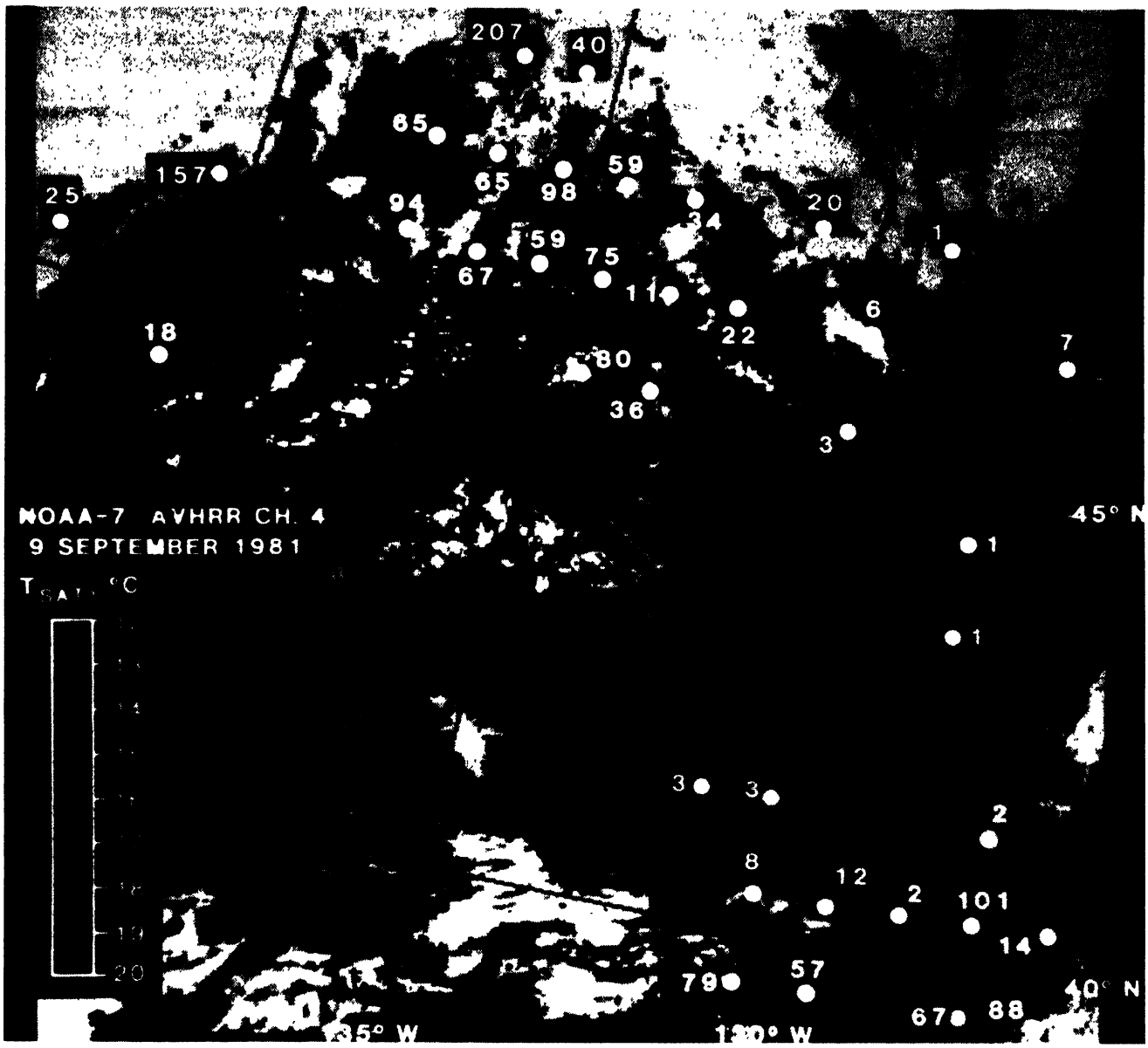


Figure 6 : Captures moyennes quotidiennes de germon par carre 1° du 1 au 15 septembre 1981 en surimposition de la temperature de surface du 9 septembre 1981, 1438 PST (adapte de Laurs *et al*, 1984)

tion satellitaire pour les pêcheries. Ils ont également été très coopératifs pour l'utilisation de la nouvelle technologie satellitaire et de ses produits lorsque ceux-ci ont été rendus disponibles.

Les premières informations et données satellitaires ont été utilisées pour la première fois pour l'aide à la pêche par les pêcheurs américains dans les premières années 1970. Cette première tentative utilisait les images du domaine visible et infra-rouge reçues par le système APT (Automatic Picture Transmission), en conjonction avec d'autres données pour préparer les cartes d'aide à la pêche transmises par radio-fac similé aux thoniers senneurs US opérant dans l'Océan Pacifique Tropical Est (Laurs, 1971). Une revue de l'utilisation des données satellites pour l'élaboration d'éléments d'aide à la pêche au germon pour les pêcheurs américains et d'autres nationalités sont disponibles dans les travaux de Fiedler *et al.* (1985), Laurs et Bruscks (1985), Njoku *et al.* (1985) et Montgomery *et al.* (1986). Les analyses routinières de température de surface à partir de données satellitaires ont été produites pour les eaux côtières au large de la côte ouest des U.S.A., depuis 1976 (Breaker and Jurick, 1975). Le format, degré de détail et méthodes de dissémination de ces analyses, sous forme de cartes, ont varié au cours des années. Breaker (1981) a décrit les méthodes utilisées pour préparer ces cartes et Short (1979) a donné une information sur l'utilisation de ces cartes par les pêcheurs. Un exemple de la forme actuelle de l'analyse de la température de surface de la mer est donné dans la figure 8. Les frontières thermiques sont obtenues à partir des données de l'AVHRR et les isothermes sont essentiellement fondés sur des observations *in situ* produites par les navires et les bouées. Ces cartes sont produites deux fois par semaine et distribuées aux pêcheurs par radio-fac-similé et par courrier.

Il existe également une analyse des frontières thermiques de température superficielle de la mer à partir des données AVHRR avec un degré de détail spatial beau-

coup plus important, disponible pour les pêcheurs de germon sous la forme d'une souscription-abonnement auprès d'une compagnie (1) qui produit une valeur ajoutée au simple traitement d'images numériques satellitaires. Des exemples de traitement graphique en dégradé et de rehaussement par ligne de frontière thermique et valeurs SST pour des zones très représentatives sont donnés dans la figure 9 (droit) et 9 (gauche) respectivement. Un traitement en fausses couleurs de l'imagerie thermique satellitaire est également disponible. Des cartes du même type que celles représentées dans la figure 9 (droit), sont distribuées aux pêcheurs en mer par radio-fac-similé et les analyses en fausse couleur sont distribuées par poste express. Un nombre croissant de pêcheurs souscrivent ou s'abonnent a ce service en raison de la très fine résolution spatiale des frontières thermiques produites. Ceci aide réellement les pêcheurs à localiser les zones favorables à la pêche du germon.

Les structures thermiques proposées à partir de l'information satellitaire décrite ci-dessus sont généralement satisfaisantes pour répondre aux besoins de la pêcherie U.S. de germon lorsqu'ils pêchent à l'intérieur d'une zone de 1 000 milles au large de la côte nord-américaine. Mais les zones au-delà de cette distance sont situées en dehors des zones de réception des stations de la côté ouest des U.S.A., pouvant recevoir des informations des satellites défilants à orbite polaire, qui passent au-dessus du Pacifique Nord. Il y a eu des tentatives de production de cartes d'isothermes et de frontières thermiques à partir des mesures et enregistrements stockés à bord du satellite durant son passage au dehors des zones de réception des stations de la côte ouest des U.S.A.

(1) Ocean Imaging Company, San Diego, California, U.S.A; la référence à un nom de compagnie ou société n'engage pas la responsabilité de la NOAA/National Marine Fisheries Service.

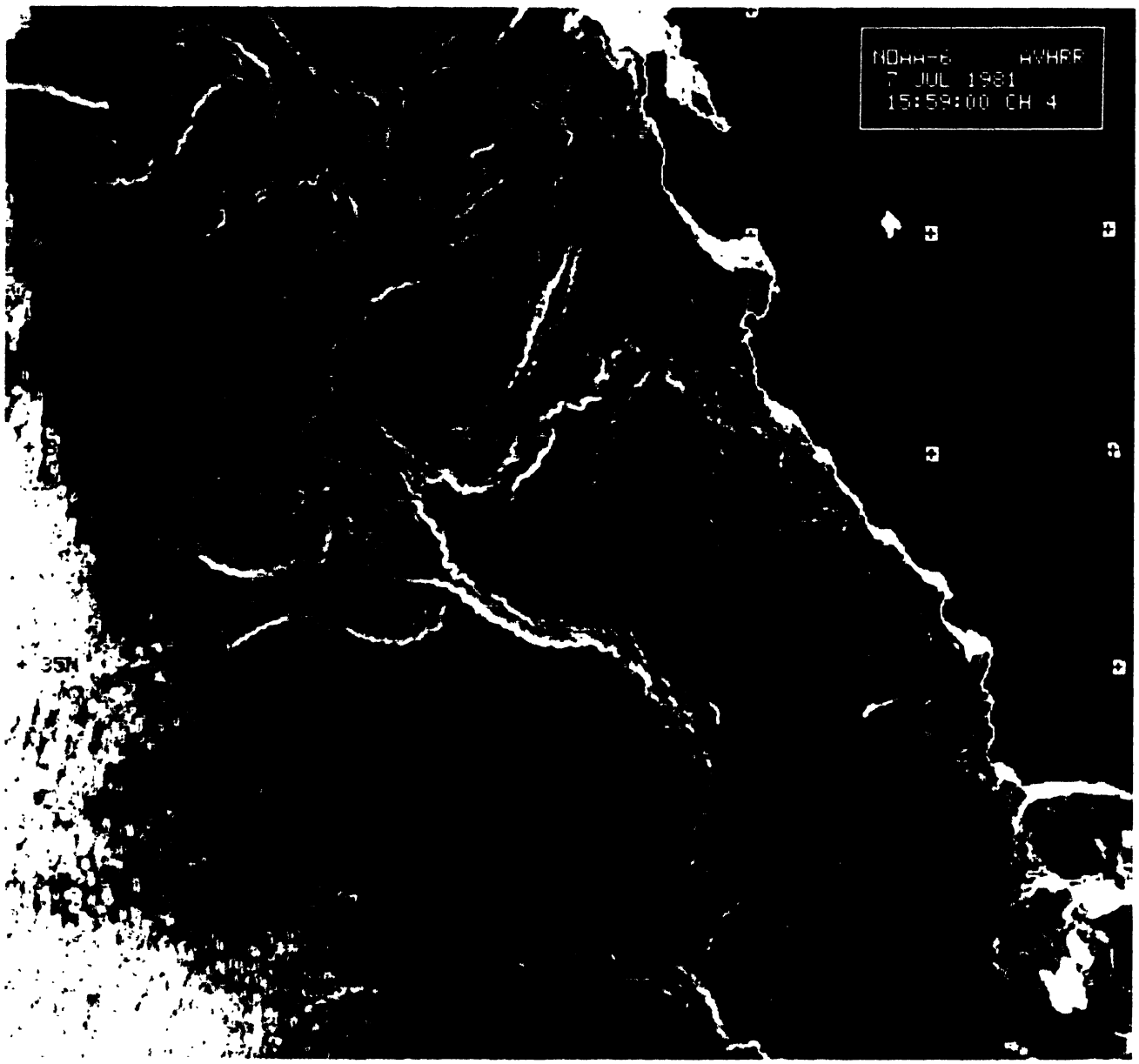
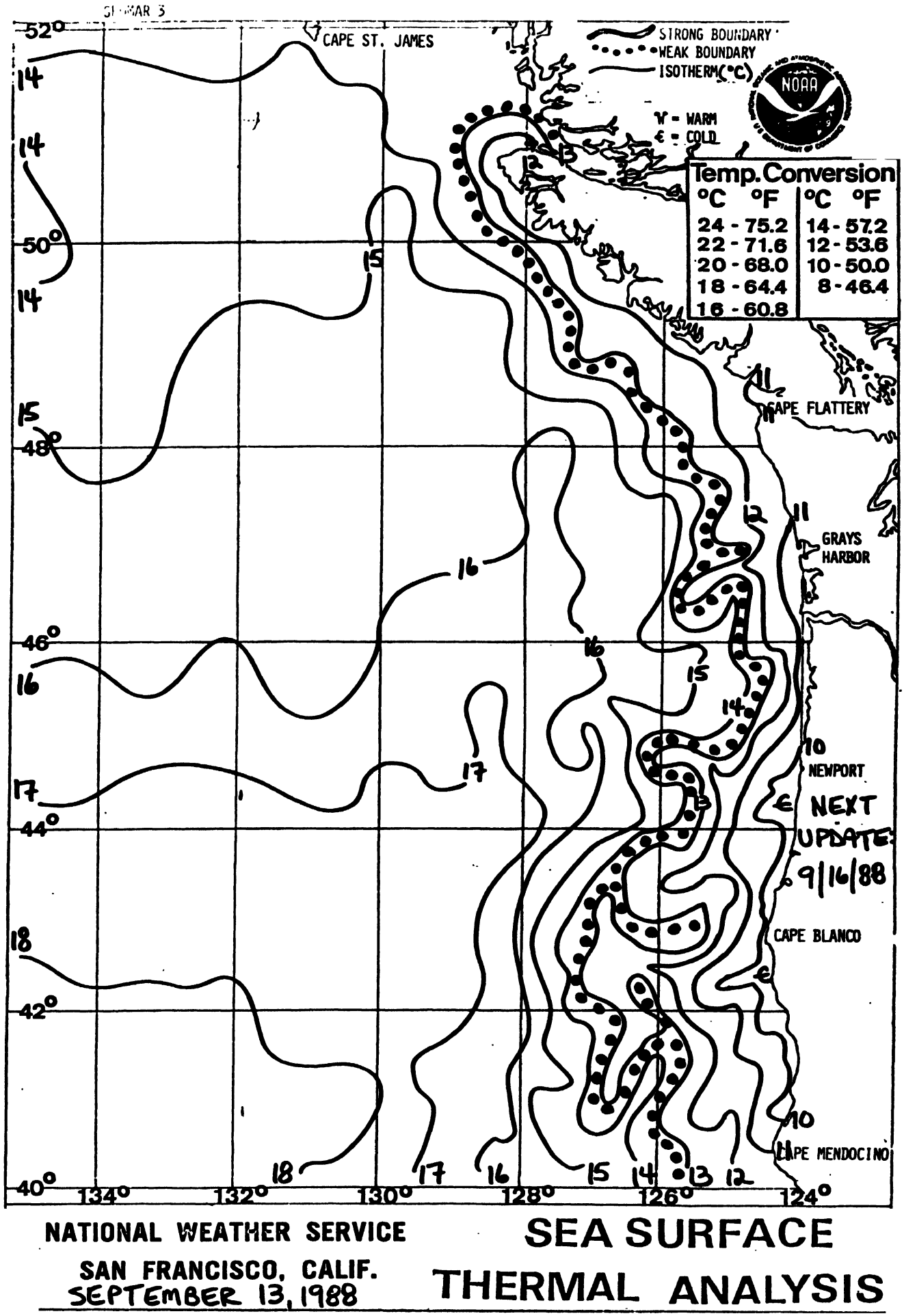


Figure 7 : Image de gradient thermique obtenu par filtrage AVHRR (adapte de Svegkovsky, 1988)



NATIONAL WEATHER SERVICE

SAN FRANCISCO, CALIF.
SEPTEMBER 13, 1988

SEA SURFACE THERMAL ANALYSIS

Figure 8 : Exemple d'analyse de temperature de surface elabore a partir de l'imagerie satellitaire et de donnees de surface

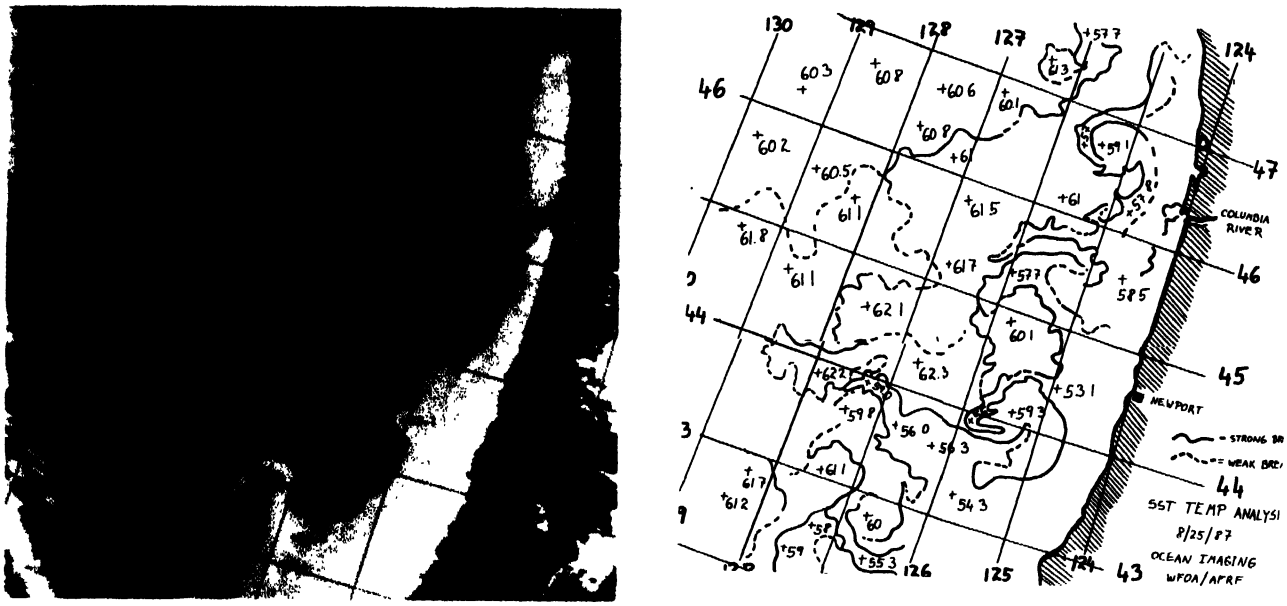


Figure 9 : Deux analyses elaborees distribuees aux pêcheurs par Ocean Imaging Company (gauche): image thermique en gris contraste avec une grille de positionnement et une surimposition de valeurs de temperature (droite) : carte preparee pour la diffusion par radio-fac simile montrant l'analyse des frontieres thermiques et une surimposition des valeurs de temperature (aimablement fourni par Ocean Imaging Company, San Diego, Californie)

Des essais ont été tentés pour produire des cartes thermiques dérivées des données satellitaires au-delà de la zone des 1 000 miles au large de la côte ouest en utilisant ces données AVHRR obtenues par une station militaire de réception localisée à Hawaï. Ces essais n'ont pas été fructueux en raison du fort coût et des délais pour la livraison des enregistrements sur bande magnétique en Californie.

Afin d'obtenir une imagerie satellitaire lorsqu'ils opèrent dans des zones lointaines, quelques pêcheurs U.S. de germon ont acheté, ou envisagent d'acheter, des équipements peu coûteux de réception et traitement définis pour la réception directe, traitement et visualisation à bord. Ces systèmes recoivent une imagerie APT (Automatic Picture Transmission), dont les signaux dans le domaine du visible et de l'infrarouge thermique correspondent à des pixels de 4 km, à partir du système de satellite à orbite polaire. Ces systèmes sont essentiellement dirigés pour augmenter la sécurité en mer, et dans des zones sans couverture nuageuse fournissent une possibilité d'interpréter les champs thermiques superficiels pour une recherche plus efficace des zones de pêche.

Des systèmes de réception de données satellitaires APT embarqués ont été utilisées à bord de navires de recherche et de pêcheurs dans le Pacifique Central Sud durant la campagne exploratoire de pêche au germon (Laurs *et al.*, 1986 et Systems West, 1988). Les systèmes APT, constituent des équipements intéressants et valable pour la réalisation de frontières thermiques associées à la zone de convergence sub-tropicale du Pacifique Sud où de fortes captures de germon sont faites. En complément, les images de nuage démontrent l'utilité de système APT comme un outil pour accroître la sécurité et l'efficacité des opérations de pêche dans les zones caractérisées par une couverture météorologique éparse et des prévisions météorologiques limitées.

De nombreux témoignages de satisfaction ont éte reçus de la part des pêcheurs de germon américains et autres nationalités, à propos de l'utilité de l'information d'origine satellitaire pour l'aide à la localisation de zones favorables à la pêche. Selon les pêcheurs qui ont utilisé largement des cartes « satellitaires », les analyses thermiques leur ont permis de gagner 25 à 30 % de leur temps de recherche et l'analyse des frontières de couleur jusqu'à 50 % (Laurs, Communication personnelle fondée sur les interviews avec les pêcheurs). Cependant l'examen rigoureux de l'impact économique de l'utilisation de données satellitaires pour la pêche au germon n'a pas été réalisé.

Remerciement

Une partie du travail évoqué dans cette revue a bénéficié d'un financement de la National Aéronautics ans Space Administration, Orders W-15,334 and W-16,509.

Références

Breaker, L.C. and F. Jurick, 1975, Providing near real-time sea surface temperatures to the California north coast fishing fleet : an approach. In : *Ocean 75* (Combined meeting of 1975 IEEE Conference on Engineering in the Ocean Environment and 11th Annual Meeting of the Marine Technology Society), San Diego, California, New York Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. 952 pp.

Breaker, L.C., 1981, The application of satellite remote sensing to West Coast fisheries. J. Mar. Tech. Soc. 15 : 32-40.

Clark, D.K., 1981, Phytoplankton pigments algorithms form the Nimbus-7 CZCS. In : *Oceanography form space*, edited by J.F.R. Gower, Plenum Press, New York pp. 227-238.

Fiedler, P.C., G.B. Smith, R.M. Laurs, 1985, Fisheries applications of satellite data in the North Pacific. Mar. Fish. Rev. 46 : 1-13.

Jurick, F.A., 1985, A comparison between North Pacific commercial albacore (*Thunnus alalunga*) catch and the satellite derived West Coast thermal boundary analysis. M.S. Thesis, Humbolt State University, Arcata, California, 79 pp.

Lauritson, L., G.G. Nelson and R.W. Porto, 1979, Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers. NOAA, Tech. Memo. NESS 197 : 44-46.

Laurs, R.M., 1971, Fishery-Advisory information available to tropical pacific tuna fleet via radio facsimile broadcast. Comm. Fish. Rev. 33 : 40-42.

Laurs, R.M., C. Hooker, L. Hreha and R. Lincoln, 1975, A uniform U.S. West Coast log book for albacore, *Thunnus alalunga* (Bonnaterre), and coastwide albacore fishery data system. Mar. Fish. Rev. 37 : 14-21.

Laurs, R.M., Clemens and L.H. Hreha, 1976, Nominal catch-per-unit effort of albacore, *Thunnus alalunga* (Bonnaterre), caught by U.S. jig vessels during 1961-1970. Mar. Fish Rev. 38 : 1-32.

Laurs, R.M., 1977, Albacore advisory fish bulletins : 77-3 through 77-9. National Marine Fisheries Service, Southwest Fisheries Center, La Jolla, California. 7 pp.

Laurs, R.M., and R.J. Lynn, 1977, Seasonal migration of North Pacific albacore, (*Thunnus alalunga*), into North American coastal waters : distribution, relative abundance, and association with Transition Zone waters. Fish. Bull. NOAA, U.S. Dept. of Commerce, 75 : 795-822.

Laurs, R.M., H.S.H. Yuen and J.H. Johnson, 1977, Small-scale movements of albacore (*Thunnus alalunga*), in relation to Ocean features as indicated by ultrasonic tracking and oceanographic sampling. Fish. Bull. NOAA, U.S. Dept. of Commerce, 75 : 347-355.

Laurs, R.M., R.J. Lynn, R. Nishimoto and R. Dotson, 1981, Albacore trolling and longline exploration in eastern North Pacific waters during mid-winter 1981. NOAA Technical Memorandum NMFS 10. 52 pp.

Laurs, R.M., R.C. Dotson, A. Dizon and A. Jamison, 1980, Observations on swimming depth and ocean temperature telemetered from free-swimming albacore. In : *Proceeding of 31st Tuna Conference* (May 11-14, 1980), edited by A. Wild, La Jolla : Inter-American Tropical Tuna Commission, pp. 33-34.

Laurs, R.M., P.C. Fiedler, and D.R. Montgomery, 1984, Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. Deep Sea Res. 31 : 1085-1099.

Laurs, R.M. and J.T. Brucks, 1985, Living Marine Resources Applications. In : *Advances in Geophysics, Satellite Oceanic Remote Sensing*, edited by Barry Saltzmen, Academic Press, London, Vol. 27, pp. 419-450.

Laurs, R.M., K.A. Bliss and J.A. Wetherall, 1986, Preliminary Results from R/V *Townsend Cromwell* South Pacific Research Survey. NOAA, Nat. Mar. Fish. Serv., Southwest Fisheries Center, Admin. Rep. LJ-86-13. 80 pp.

Laurs, R.M., J. Svejkovsky and M.W. Hess, (in prep.) A case study relating variations in albacore tuna fishing success and habitat to oceanographic and marine weather conditions measured by satellite scatterometer, altimeter and infrared sensor.

McClain E.P., W.E. Pichel, C.C. Walton, Z. Ahmadd and J. Sutton, 1983, Multichannel improvements to satellite-derived global sea surface temperatures. Advances in Space Res. 2 : 43-47.

Miyabe, N. and N. Bartoo, 1987, Report of the tenth North Pacific albacore workshop. NOAA, Nat. Mar. Fish. Serv., Admin. Rep. LJ-87-27, La Jolla, California, 19 pp.

Montgomery, D.R., R.E. Wittenberg-Fay and R.W. Austin, 1986, The applications of satellite-derived ocean color products to commercial fishing operations. Mar. Technol. Soc. J. 20 : 72-86.

Njoku, E.G., 1985, Satellite-derived sea surface temperature : Workshop comparisons. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 66 : 274-281.

Pearcy, W.G. and J.L. Mueller, 1970, Upwelling, Columbia River plume and albacore tuna. Proc. of the 6th Int. Symp. on Remote Sensing of the Environment, Univ. of Mich., pp. 1101-1113.

Short, K., 1979, How Satellites can help you catch more fish and cut costs. Nat. Fish. 60 : 38-39.

Smith, R.C. and W.H. Wilson, 1981, Ship and satellite bio-optical research in the California Bight. In : *Oceanography from Space*, J.F.R. Gower, editor, Plenum Press, New York, pp. 281-294.

Svejkovsky, J., 1988, Remotely sensed ocean features and their relation to fish distributions. In : *Marine Organisms as Indicators*, edited by D.F. Soule and G.S. Klepple, Springer-Verlag, New York, pp. 177-197.

System West Inc., 1988, Final report for work performed under the Saltonstall-Kennedy Grant no. NA-88-ABH-00021, submitted to National Marine Fisheries Service, Regional Office, Terminal Island, California. 33 pp.

Uda, M., 1973, Pulsative fluctuation of oceanic fronts in association with tuna fishing grounds and fisheries. J. Fac. Mar. Sci. Technol., Tokai Univ. 7 : 245-265.

5.3 Télédétection aéro-spatiale et pêche thonière en Atlantique inter-tropical

Jean-Michel STRETTA[1] et Michel PETIT[1]

1 Océanographes de l'ORSTOM Centre ORSTOM BP 5045 34032 Montpellier cedex (France)

1. INTRODUCTION

Nous avons vu plus haut (chapitre 2.1) que parmi les paramètres couramment utilises pour decrire l'environnement et la distribution des thons, la température et plus particulièrement la temperature de surface ont fait l'objet de nombreux travaux qui definissent les préférendums thermiques ou se rencontrent les différentes espèces de thonidés. De plus, de nombreux auteurs estiment que la nourriture va induire la distribution des thons au sein des bornes definies par les parametres physiques et physiologiques (Blackburn 1965; Sund *et al.* 1981; Stretta, 1988).

2. PECHES THONIÈRES ET CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT

2.1. Pêches thonières et température de surface dans le golfe de Guinée

Dans le Golfe de Guinée, les captures significatives d'albacores et listaois sont réalisees dans une gamme de temperature qui s'etend de 22 à 29° C. La distribution des prises en fonction de la temperature de surface est très variable suivant les régions considerees. Dans la recente synthèse thon-golfe de Guinée, Stretta (1988) définit pour cette region de l'Atlantique huit secteurs de pêche différente (cf figure 1); c'est ainsi que le maximum des captures dans le secteur du CAP LOPEZ se situe entre 23 et 25°C, alors que pour le secteur SHERBRO, ce maximum se situe entre 27 et 28°C. Au sein d'un même secteur de pêche, on peut egalement trouver une distribution de prises en fonction de températures très différentes selon la saison : dans le secteur GHANA, les prises maximales se font entre 25 et 26°C au cours du troisième trimestre, alors qu'au premier trimestre, la majeure partie des captures se fait dans des eaux à 27-28°C. Cela montre que la seule température de surface le jour de la pêche n'est pas le parametre déterminant, d'autant plus que ce sont les mêmes poissons qui migrent du secteur CAP LOPEZ au secteur SENEGAL en passant par les secteurs SHERBRO et EQUATEUR (Miyabe et Bard 1986). A une temperature donnée correspondra donc une fertilité différente de la masse d'eau suivant la région et la saison.

2.2. Rappel des mécanismes d'enrichissement

A chacune des zones et/ou des périodes de pêche évoquées ci-dessus, est associé un phénomène d'enrichissement particulier qui débute quatre à six semaines auparavant (Stretta, 1988). Ces phénomènes d'enrichissement peuvent être :

– un upwelling côtier, avec pour corollaire la formation d'une zone frontale entre les eaux froides issues de l'upwelling et les eaux chaudes presentes. C'est le cas pour les périodes de pêche du Cap Lopez, du Sénegal, du Ghana et d'Angola en eté boreal;

– un dôme thermique pour la zone SHERBRO en éte boreal et la zone ANGOLA en hiver boreal;

– la divergence equatoriale pour la zone de pêche EQUATEUR en été boreal;

– la crête thermique pour la zone de pêche EQUATEUR.

Comme nous l'avons vu plus haut (chapitre 2.1.), ces zones d'enrichissement ont un point commun : celui des mouvements verticaux de la thermocline dans la couche euphotique. Ces mouvements verticaux amènent dans la couche éclairée des eaux infrathermoclinales riches en sels nutritifs. Toutefois, en saison chaude, surtout dans la zone équatoriale entre 1°N et 7°S, on assiste a une forme d'enrichissement plus difficilement quantifiable liee a l'action d'ondes longues piégées à l'equateur. Ce phenomene favoriserait également une remontée des eaux infrathermoclinales dans la couche euphotique.

2.3. Zones d'enrichissement et pêche

Les liataos et les juveniles d'albacore sont pêches dans des zones qui ont, au prealable, subi un processus

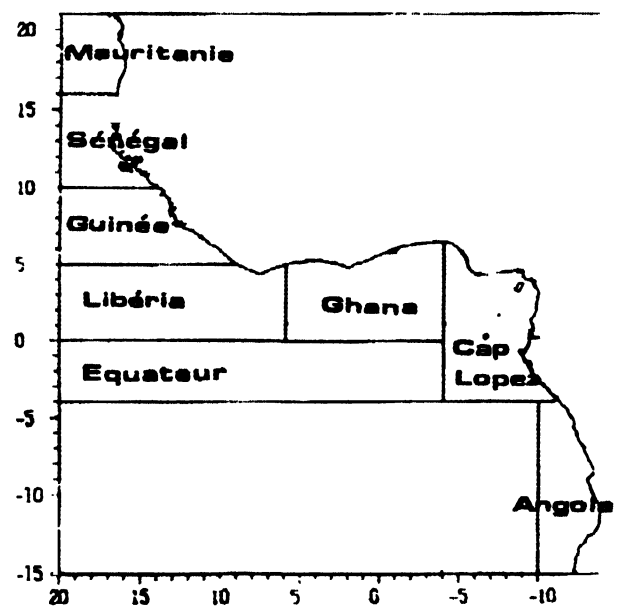


Figure 1. Secteurs de pêche en Atlantique d'apres Stretta (1988)

d'enrichissement et de maturation de la masse d'eau; ils se déplacent au cours de leur migration d'une riche à une autre (Stretta et Slepoukha 1983a). Ces déplacements sont conditionnés par une quête incessante de nourriture pour répondre ainsi à leurs importants besoins physiologiques. Les zones de pêche sont associées à la présence d'une structure favorisant l'enrichissement de la masse d'eau avant l'arrivée du poisson. Ce qui importe dans l'étude de l'environnement des thons, ce n'est pas la température de surface relevée le jour de la pêche mais plutôt l'analyse du passé hydrologique de la masse d'eau.

Dans le golfe de Guinée, mises à part les pêches de thonidés associés à des systèmes concentrateurs de poisson (Stretta et Slepoukha, 1986), il arrive que des thons soient pêchés dans des eaux au sein desquelles aucun système productif ne se soit manifesté auparavant (ou tout au moins n'ait pas été détecté). Est-ce que l'absence (ou la faible intensité) de ces structures favorisant un enrichissement de la masse d'eau ou alors une extrême ampleur de ces mêmes structures, aura une influence sur la présence du poisson ? Par ailleurs, Herbland *et al.* (1983) considerent le fait que dans l'océan Atlantique tropical oriental les variations à court terme des conditions hydrologiques (circulation verticale et horizontale et mélange turbulent associé) ont probablement plus d'importance qu'on ne le pense et il semble que toute la zone équatoriale soit soumise à des sortes de « pulsations verticales » encore mal expliquées et en tout cas non modélisées. Parfois, ces cellules d'upwelling atteignent la surface : elles pourront alors être détectées par thermographie de surface. Ces variations hdyrologiques à court terme — qui vont être à l'origine des conditions planctoniques et de la production d'animaux fourrage — sont si imprévisibles que la stratégie *r* de l'opportunisme est d'apres Valiela (1984) favorable à long terme pour les animaux pélagiques.

3. BILAN DES RECHERCHES EN HALIEUTIQUE ET TELEDETECTION AEROSPATILE DANS L'ATLANTIQUE INTERTROPICAL

3.1. Historique

Les études classiques de l'environnement des thonidés dans le golfe de Guinée, au sein de contextes thermiques particuliers (les fronts thermiques) ce sont rapidement heurtées à la difficulté de cerner les « mouvements » d'une zone frontale à partir d'un navire océanographique. L'émergence, à cette époque, de la technique de la ratiométrie infra-rouge laissait entrevoir les possibilités de mesurer la température de la mer à partir d'un avion. L'avantage d'un avion réside dans le fait qu'il est capable de couvrir rapidement une large zone océanique fournissant ainsi une vaste image quasi instantanée (de l'ordre de quelques jours) du champ thermique superficiel. L'utilisation de ce type de vecteur permet également de recenser toutes sortes d'apparences à la surface de la mer (bancs de thons, objets flottants, cétacés, etc...) et de les positionner dans un contexte thermique.

3.2. Groupe de radiométrie Aérienne Atlantique

Les opérations de radiométrie aérienne ont débuté en 1972 avec le concours du groupement d'armateurs INTERTHON[2] pour étudier au large des côtes du Gabon la zone frontale associée à de très importantes pêches de thonidés. L'avion[3] d'INTERTHON était équipé d'un radiomètre infra-rouge[4]. De 1974 à 1976, des opérations du même type se sont poursuivies dans cette même région avec la collaboration étroite de divers organismes (CNEXO[5], Laboratoire d'Optique Atmosphérique[6] de Lille, CMS[7], ORSTOM, INTERTHON) et des navires océanographiques Capricorne et Nizery. Ces opérations ont permis d'analyser les mouvements de la zone frontale, l'enrichissement des masses d'eau et les mécanismes de concentrations de thons (Dufour et Stretta, 1973 : Stretta, 1977; Stretta *el al.*, 1973; Stretta et Surugue, 1977, Stretta *et al.*, 1977; Viollier, 1976). La méthodologie utilisée lors de ces opérations de radiométrie aérienne est décrite dans Marsac *et al.*, (1987).

3.3. Le Bureau d'Aide à la Pêche (BAP)

A partir de 1978, les opérations de radiométrie aérienne se sont déroulées dans le cadre du Bureau d'Aide à la Pêche (BAP). Créé fin 1977 par la signature d'une convnetion entre l'ORSTOM et INTERTHON, le BAP s'ouvrait en mars 1978 dans l'enceinte du Port de pêche d'Abidjan.

3.3.1. Objectifs du BAP

Cette convention fixait au BAP les objectifs suivants :

— collecter les informations concernant la pêche et les conditions hydrologiques dans le golfe de Guinee;

— tenir à jour des fichiers concernant ces donnees;

— fournir à la flottille thonière cotisant à INTERTHON des analyses sur les conditions hydrologiques dans le golfe de Guinée;

— conseiller l'équipage de l'avion[8] d'INTERTHON dans l'établissement des plans de vol;

— prendre en charge les vols lors de la reconnaissance de nouvelles zones de pêche.

3.3.2. Actions entreprises

Dès la mise en place du BAP, nous avons collecté en routine les données suivantes :

— les paramètres écologiques associés aux bancs de thons en les relevant à partir des livres de bord remplis

---

2 INTERTHON : societe anonyme. Coopérative d'intérêt maritime a capital variable. Concarneau (France).

3 Britten Norman (de 1972 a 1977)

4 Radiometre infra-rouge BARNES PRT-5 (Fenêtre spectrale utilisee : 8-14 μ m)

5 CNEXO : ancien sigle de l'IFREMER (Institut Français pour l'Exploitation de la mer (Paris, France).

6 Faculté des Sciences et Techniques de Lille (France).

7 CMS : Centre de Météorologie Spatiale (Lannion, France).

8 Beech Craft 18 Volpar Turboliner (A partir de février 1978).

par les patrons. Seuls les coups de senne pour lesquels les patrons donnaient suffisamment de détails et de précisions ont été retenus. Nous avons ainsi fiché plus de 10 000 coups de senne (Stretta, 1985);

— les données historiques concernant les température de surface et de subsurface, la vitesse et la direction des vents;

— les données historiques concernant la pêche thonière par les flotilles internationales dans l'Atlantique intertropical;

— les données thermiques satellites compilées sur une semaine de la NOAA[9] (cartes GOSSTCOMP[10]);

— les données thermiques fournies par le NWS[11];

— les données thermiques relevées par l'avion d'INTERTHON;

— les données thermiques du satellite européen METEOSAT;

— les données thermiques de surface et météorologiques fournies par les messages « Ships » des navires marchands reçus à l'ASECNA[12] à Abidjan.

Dans l'océan Atlantique, nous avons axé nos recherches sur le comportement des thons au sein d'une zone frontale en période de forte activité de pêche avec l'appui de l'avion d'INTERTHON. Grâce à une réelle coopération entre l'océanographe embarqué et l'équipage de l'avion, il a été possible d'assurer une veille radiométrique : ce type d'action est indispensable lorsque l'on est dans un contexte de pêche active.

Après le vol (ou le plus souvent à bord de l'avion en cours de vol), les données sont dépouillées manuellement et une cartographie du champ thermique de surface est réalisée. Cette rapidité d'exécution est de règle car elle permet :

— la modification éventuelle du plan de vol au cours de celui-ci,

— la diffusion par radio à partir de l'avion d'un « bulletin » donnant aux patrons des thoniers des informations sur la situation thermique de la journée et de son évolution par rapport aux jours précédents. Cette action a surtout été menée dans la zone du cap Lopez au moment où l'instabilité du front était maximale. Les thoniers pouvaient ainsi se situer au sein d'un système frontal aux mouvements incompréhensibles à l'échelle d'un navire recherchant du poisson;

— la communication à la flottille de la position et des caractéristiques des bancs repérés par l'avion ainsi que des prévisions à court terme (1 à 3 jours) sur l'évolution du système front-thonides : ces tentatives ont été faites dès 1976 entre le cap Lopez et l'île de São Tomé;

— l'élaboration de petits documents de synthèse pour les pêcheurs sous la forme de cartes de température de surface.

Dans certains cas, le trajet de l'avion « dicté » par le radiomètre a été tenté avec succès par le pilote et l'océanographe afin de survoler les zones de même température où se concentrait le poisson. Ces vols ont lieu au large du Gabon en juillet et au large de la Côte d'Ivoire en août-septembre.

En complément des données thermiques relevées à partir de l'avion, nous avons dès 1978 analysés des cartes de thermographie de surface dressées à partir de données satellitaires. C'est ainsi que de septembre 1978 à mai 1979, une collaboration entre la BAP, le CNES[13], le CMS, le CNEXO et le Bureau de Télédétection de l'ORSTOM s'est instituée pour la réception, le traitement et l'envoi quotidien, sous forme de télex, de données thermiques du satellite européen METEOSAT-1 (Stretta *et al.*, 1980). La chaîne de traitement est présentée par Delclaux (1978 a et b). Devant le manque de fiabilité et la dérive du radiomètre du satellite l'expérience a été interrompue en mai 1979.

Du mois d'août 1981 à janvier 1983, profitant du Programme de l'Année Internationale du Listao Atlantique[14], une nouvelle collaboration s'est instituée entre le BAP à Abidjan d'une part et l'Antenne OSTOM auprès du CMS de Lannion, la Météorologie Nationale (CMS), le CNEXO et le Secrétariat d'Etat à la Marine Marchande d'autre part, pour la transmission entre Lannion et Abidjan par télécopie, des cartes de température de surface du golfe de Guinée (Citeau *et al.*, 1981; 1986). La figure 2 présente un exemple de carte de température expédiée. Un autre mode de diffusion a été utilisé : le fac-similé. *En utilisant le réseau fac-similé de la Météorologie Nationale, les cartes émises à partir de Lannion sont parvenues (via Paris) dans de bonnes conditions sur le récepteur de l'ASECNA à Dakar. Afin de permettre la réception de ces mêmes cartes par les navires en mer, elles furent ré-émises par fac-similé radio dans la bande des 25 mètres (12 305 khz) à partir de l'émetteur de Sainte Assise (Météo-Paris) et dans la bande des 15 mètres (19 750 khz) à partir de l'émetteur de Dakar. Au terme d'une année et demie d'observations satellitaires régulières, la variété des situations océaniques et climatiques rencontrées, nous permet de dire que pour la plupart des anomalies ou événement majeurs avant une trace à la surface de l'océan, METEOSAT-2 a assuré une écoute fidèle et parfois même supérieure en qualité aux produits standards qui font référence à la matière* (Citeau *et al.*, 1984).

Jusqu'au mois de décembre 1981, les données thermiques satellitaires étaient analysées visuellement. Il était parfois possible de cerner des zones les plus favorables à la pêche thonière en confrontant les données recueillies en temps réel (avion, thoniers, navires marchands, etc), les données reçues en temps quasi réel (cartes GOSSTCOMP, cartes METEOSAT) d'une part et les données historiques d'autre part.

A partir des résultats acquis dans la dynamique et dans les phénomènes d'enrichissement des masses d'eaux présentes dans un système frontal, il a été possible de développer une méthode d'analyse originale de prévisions de pêche. Cette méthode s'appuie presque exclusivement sur des données radiométriques satellitaires; l'information radiométrique aéroportée est alors utilisée pour vérifier la température de surface mesurée par satellite et la présence effective du poisson.

---

9 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration (USA).

10 GOSSTCOMP : Global Operational Sea Surface Temperature Computation.

11 NWS : National Weather Service (USA).

12 ASECNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne (Dakar, Sénégal).

13 CNES : Centre National d'Etudes Spatiales (Toulouse, France).

14 International Skipjack Year Program (1979-1982) ICCAT (Madrid). Anonyme (1986).

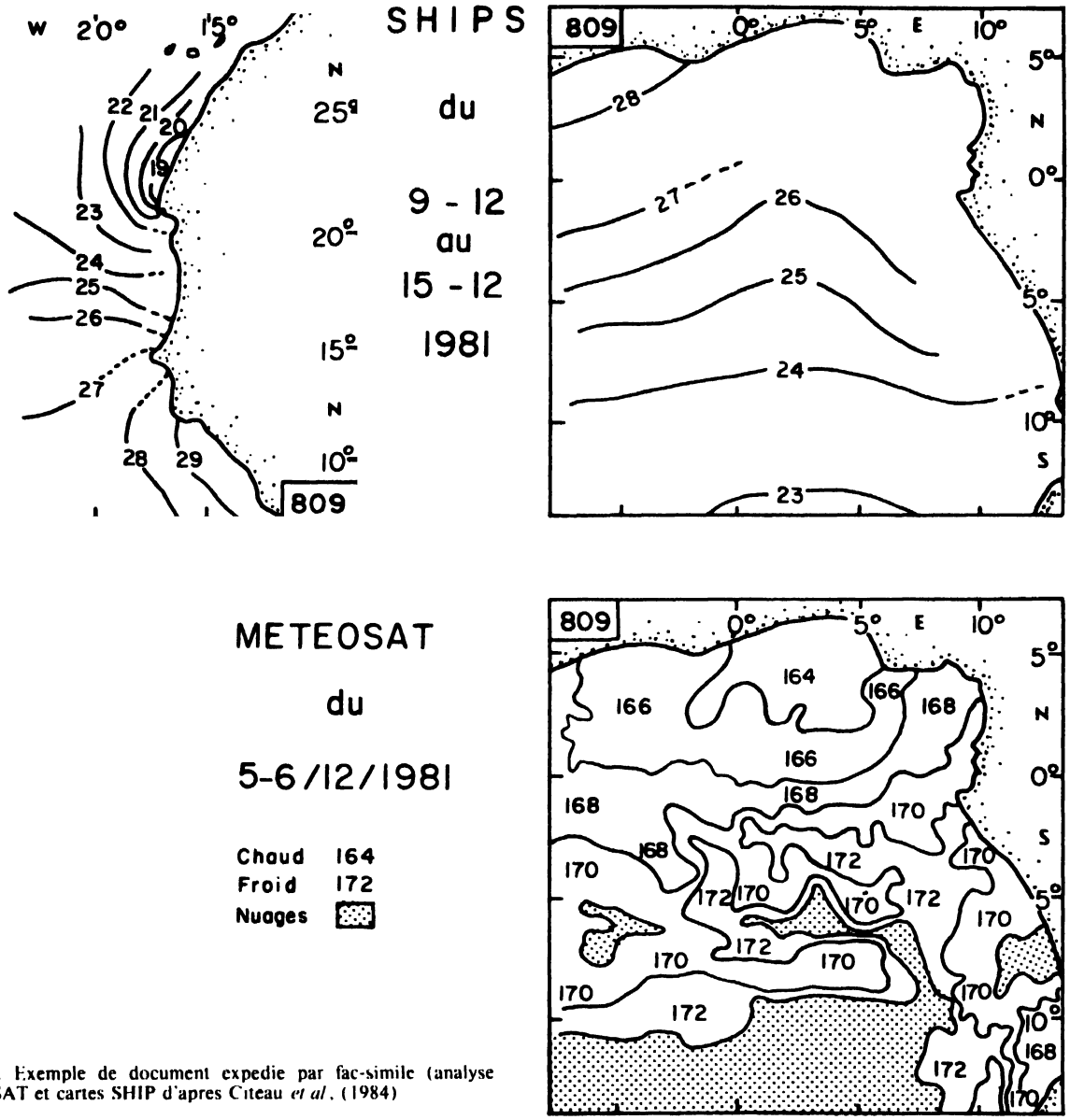


Figure 2. Exemple de document expedie par fac-simile (analyse METEOSAT et cartes SHIP d'apres Citeau *et al.*, (1984)

A partir de janvier 1982, nous avons distribue aupres de la flottille INTERTHON des analyses prévisionnelles sous la forme d'un « BULLETIN PREVISIONNEL ». Ces bulletins sont réalisés à partir du logiciel prévisionnel PREVI-PECHE que nous avons développe dans le cadre du BAP. En raison du départ des flottilles thonières française et ivoirienne pour l'océan Indien debut 1985, nous avons interrompu la diffusion des bulletins prévisionnels.

Si l'on fait le bilan des activites du BAP il apparait que :

— de 1978 à 1982 nous avons effectué environ un millier d'heures à bord de l'avion d'INTERTHON et permis à partir de l'avion equipé de son radiomètre infra-rouge de décrire les zones d'action de la flottille et de guider les thoniers au sein de structures thermiques parfois très complexes. Pendant cette période où notre action se faisait au jour le jour, nous avons diffusé à partir de l'avion plusieurs notes techniques à l'attention des patrons en mer (Marsac *et al.*, 1987);

Pour les années 1979 et 1981, il a été possible d'évaluer notre action aux alentours de 5-7 % des prises. Ce genre de calcul est difficile a faire car aucun patron n'accepte de reconnaitre la « paternite » du BAP sur les concentrations de thons trouvées par la flottille sur nos indications.

— de janvier 1982 à juillet 1984, nous avons diffuse 81 « BULLETIN PREVISIONNEL » valables pour l'Atlantique intertropical.

— à titre experimental nous avons adapte notre logiciel aux donnees thermiques de l'ocean Indien occidental en envoyant a l'equipe ORSTOM des Seychelles 27 « BULLETIN PREVISIONNEL EXPERIMENTAL » pendant l'annee 1982.

3.4. Présentation du logiciel prévisionnel : PREVI-PECHE

3.4.1. Introduction

Jusqu'à ces dernières années, la stratégie de pêche se limitait au choix saisonnier des secteurs traditionnels de pêche. Avec l'apparition des moyens aériens pour la détection à vue et de la radiométrie aérienne, il est possible d'élaborer des tactiques opérationnelles par le guidage des bateaux sur les lieux de pêche ou par des prospections hors de la zone d'action de la flottille de

pêche. L'état actuel des connaissances sur l'environnement des thons, nous ont permis de jeter les bases du concept pour une stratégie de pêche à plus long terme. La conception et la mise au point du logiciel PREVI-PECHE découle de ce besoin pour répondre aux conditions futures d'une exploitation rationnelle des stocks en liaison avec la concurrence entre les flottilles, aux lois qui se rapportent aux ZEE et à la question permanente du pêcheur : où trouver le poisson ?

Comment répondre à cette question sachant qu'à l'heure actuelle, les mouvements des thons ne peuvent pas être observés directement depuis l'espace, nous devons donc les déduire en élaborant des modèles qui s'appuient sur les connaissances que nous avons du comportement des thons.

Si l'on part du principe que les concentrations de thons sont influencées par la température de surface et par la nourriture disponible, se pose alors le problème de la localisation de cette nourriture. Si l'on connaît, dans les grandes lignes, l'implication directe entre la présence des thons et les paramètres d'environnement, pourquoi ne pourrait-on pas utiliser l'implication inverse, à savoir déduire la présence des thons à partir des données d'environnement ?

Pour trouver les zones de concentration de thons, il nous faudrait donc rechercher les zones à forte densité de nourriture; le problème de la recherche de ces zones nous entraîne à trouver dans l'océan les zones à forte productivité.

Nous savons par ailleurs que les masses d'eau épipélagiques de l'océan inter-tropical sont pauvres dans des conditions de stabilité au sein de ce que Herbland et Voituriez (1977) ont appelé la Structure Tropicale Typique (STT). Il est toutefois possible de délimiter les zones riches en phytoplancton et zooplancton, zones ou la nourriture potentielle du thon sera abondante. Nous avons vu plus haut que ce problème peut être abordé théoriquement en étudiant le passé hydrobiologique d'une masse d'eau. Cette analyse revient a rechercher la signature thermique en surface des mécanismes de fertilisation des masses d'eau (Stretta et Slepoukha, 1983).

3.4.2. Principe de la méthode

Une forte densité de nourriture pour les thons résulte d'une forte productivité de la masse d'eau. Dans l'océan tropical, le mouvement de la thermocline vers la surface (ou seulement dans la couche euphotique) a d'importantes conséquences pour l'enrichissement en sels nutritifs (Voituriez et Herbland, 1977). Le résultat de ce mouvement est une diminution de la température de surface (dans le cas bien sûr où la thermocline atteint la surface).

Au sein de la STT, le développement d'une forte productivité est le résultat d'un bouleversement écologique ou « catastrophe écologique » selon la théorie de R. Thom (Petit, 1986) comme dans les zones frontales (Dufour et Stretta, 1973), l'upwelling équatorial (Le Borgne, 1977; Voituriez et Herbland, 1982) et les dômes thermiques (Voituriez et Dandonneau, 1974). Le résultat de ces bouleversements est la production d'animaux fourrage pour les thons.

Dans leur étude de l'upwelling mauritanien, Herbland *et al.*, (1973) étudient l'évolution des paramètres de surface (dont la température) d'une masse d'eau pendant plusieurs jours en suivant sa dérive à l'aide d'une drogue le long de la côte depuis la source de l'upwelling

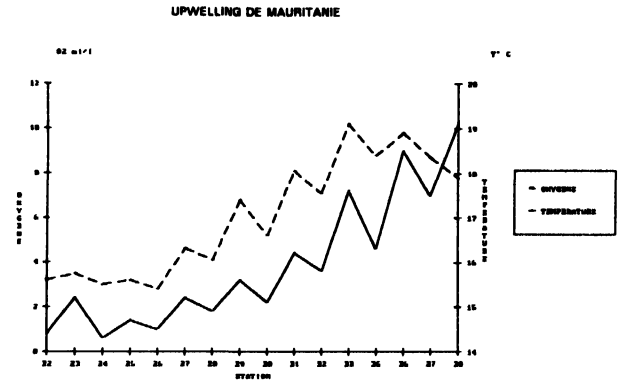


Figure 3a. Suivi de la drogue dans l'upwelling mauritanien d'après Herbland *et al.*, (1973); évolution de la température de surface et de la teneur en oxygène dissous

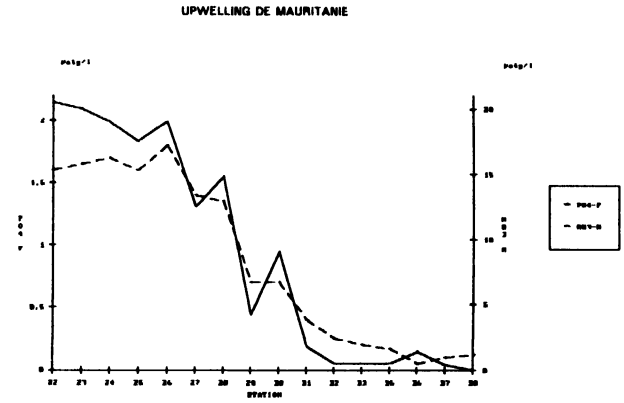


Figure 3b. Suivie de la drogue dans l'upwelling mauritanien d'après Herbland *et al* (1973); évolution de teneurs en sels nutritifs (PO_4-P et NO_3-N)

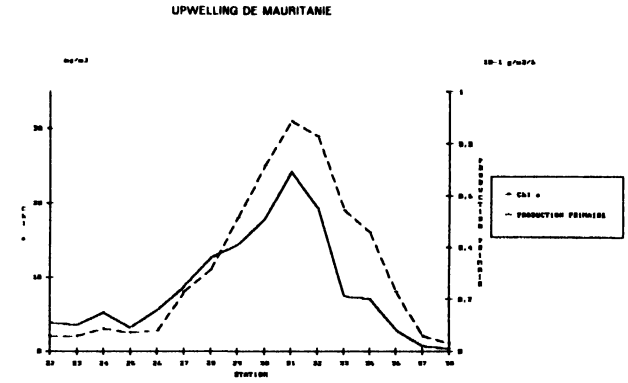


Figure 3c : Suivi de la drogue dans l'upwelling mauritanien d'après Herbland *et al.* (1973); évolution de la biomasses du phytoplancton (exprimée en mg/m^3) et production primaire nette

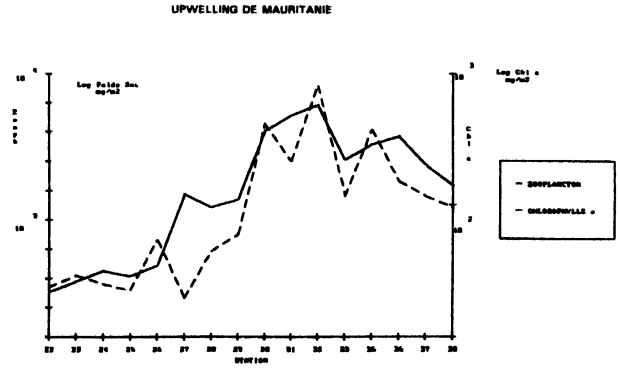


Figure 3d. Suivi de la drogue dans l'upwelling mauritanien d'après Herbland *et al.*, (1973); évolution de la biomasse du zooplancton et de la chlorophylle *a* (exprimées en log mg/m^2)

et ce pendant neuf jours avec deux stations par jour (stations 22 à 38). Ces auteurs mettent en évidence le fait qu'au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source de l'upwelling :

– la température de surface et la teneur en oxygène dissous augmentent (cf. figure 3a);

– les teneurs en sels nutrifis (PO_4-P et NO_3-N) diminuent (cf. figure 3b);

– au niveau biologique, la biomasse du phytoplancton (exprimée en mg/m^3) et la production primaire (exprimée en $g/m^3/h$) nette croissent pendant 4,5 jours (cf. figure 3c);

– la biomasse du zooplancton (exprimée en mg/m^2) croît parallèlement à l'accroissement de la chlorophylle *a* (exprimée également en mg/m^2) (cf. figure 3d); le taux moyen d'augmentation journalier du zooplancton est de 17 %. Ils concluent que : *« la drogue a effectivement suivi une masse d'eau au sein de laquelle la production de matière vivante s'est régulièrement développée »*.

Si l'apparition d'eaux froides à la surface de l'océan est le signe annonçant le début d'un enrichissement de la masse d'eau, il convient à présent de suivre les mécanismes de fertilisation. Alors se pose la question de savoir comment suivre dans le temps la maturation de la masse d'eau.

Le suivi de la drogue dans l'upwelling mauritanien par Herbland *et al.*, (1973) montre que l'augmentation de la température de surface reflète l'augmentation des biomasses du phytoplancton et du zooplancton (cf. figure 3a et 3d).

On peut donc dire qu'une diminution de la température de surface suivi d'une lente augmentation de cette température de surface représentent la signature thermique de surface des mécanismes de fertilisation et de maturation au sein de la masse d'eau.

Mais l'évolution de la temperature de surface est-elle un bon traceur de la productivité d'une masse d'eau ? Les travaux de Herbland *et al.*, (1973) le montrent. Sur le plateau continental de la Côte d'Ivoire, Dandonneau (1972) trouve que l'eau de surface est *« très représentative de toute la zone euphotique en période de poussée phytoplanctonique »*. Yentsh (1973) trouve que les prises de thonidés en Atlantique nord sont plus importantes dans des eaux de forte productivité et que globalement la mesure de la seule température de l'eau pourrait aider les pêcheries pélagiques.

Cette signature thermique de surface peut donc être détectée à distance par radiométrie infrarouge. Les outils privilégiés pour le repérage de ces variations des conditions hydrologiques de surface sont l'avion et le satellite météorologique équipés de radiomètres infrarouge. Toutefois, il serait préférable d'y ajouter une réserve à savoir que cette signature thermique de surface ne sera valable que si la masse d'eau qui arrive en surface est jeune, c'est-à-dire qu'elle provient d'une profondeur suffisamment importante pour être riche en sels nutritifs et pauvre en phytoplancton. Que se passerait-il dans le cas contraire, à savoir une masse d'eau qui atteint la surface après un séjour plus ou moins prolongé dans la couche euphotique ? La température de surface ne serait pas celle d'une eau jeune et froide et le processus de la production de matière vivante serait alors bien entamé. Dans ce cas, une partie du passé hydrologique de cette masse d'eau aura été masqué.

Quel est le délai entre l'apparition en surface des eaux froides et la présence de la nourriture des thons ? Ce délai entre le début du processus d'enrichissement et la présence de la nourriture des thons est estimé entre quatre à six semaines par Mendelsshon et Roy, (1986).

En s'appuyant sur les évolutions des températures de surface pendant cinq saisons de pêche au large du cap Lopez (références citées dans le § 3.1.) et au large de la Côte d'Ivoire (Stretta *et al.*, 1973; Stretta et Petit, à paraître), nous avons tenté d'élaborer ce que nous avons appelé un « Scénario Thermique Idéal » (STI) pour déterminer quels sont les événements et leur durée qui concourent à l'obtention de conditions hydrologiques favorables à la pêche thonière.

Ce scénario thermique idéal bâti sur une analyse empirique des conditions hydrologiques de surface associées à des concentrations de thonidés dans la région du cap Lopez pourrait être le suivant :

(1) apparition en surface des eaux froides issues de l'upwelling côtier;

(2) maturation de ces eaux pendant 4 semaines;

(3) stabilisation thermique pendant une à deux semaines au cours desquels la zone serait favorable à la présence de thon (cf. figure 4).

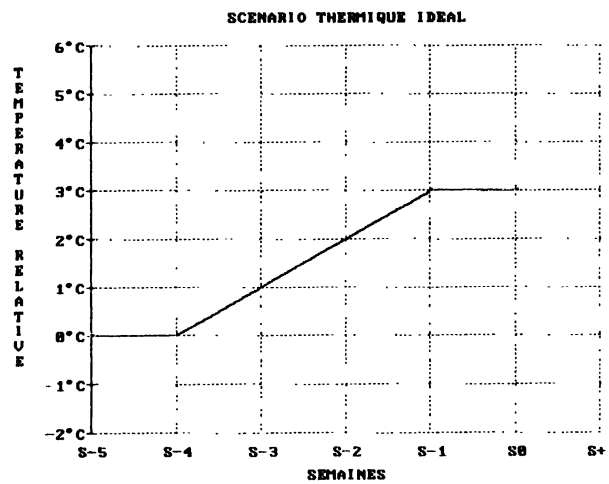


Figure 4. Scenario thermique ideal

Une nouvelle question se pose : comment traduire la maturation de la masse d'eau ? Entre la température de la masse d'eaux froides qui atteint la surface et la température de surface au moment du début de l'activité de pêche, nous pouvons traduire la maturité de la masse d'eau par une élévation de sa température de 1°C par semaine.

En s'aidant des évolutions des températures de surface pendant cinq saisons de pêche au large du cap Lopez (Gabon) et au large de la Côte d'Ivoire, nous avons constaté que la pêche ne débutait pas immédiatement après ce que nous nommons la période de maturation de la masse d'eau, mais qu'elle ne commençait qu'une à deux semaines après une période de stabilisation thermique en surface. A *contrario*, la saison estivale de pêche de 1974 au cap Lopez (Stretta, 1977), avait montré un bouleversement quasi quotidien des isothermes de surface après la période de maturation : il s'en était suivi une quasi absence de pêche.

Notre schématisation de l'écosystème est poussée à l'extrême car à partir d'une seule variable d'état (la température de surface), nous allons suivre dans l'espace et dans le temps une succession d'actions qui

débute par l'arrivée en surface des eaux infra-thermoclinales jusqu'à la présence d'organismes proies pour les thons en passant par les actions d'enrichissement et de maturation de la masse d'eau.

Le modèle le plus simple consistera à suivre par satellite l'évolution dans l'espace et dans le temps de la masse d'eaux froides qui apparaît en surface afin de cerner, compte tenu de ce que nous venons d'exprimer sur les délais délais entre le déclenchement d'un processus d'enrichissement et celui de la présence du thon, la période et la zone ou la probabilité de trouver des animaux proies sera la plus élevée. En fait, le modèle consistera à comparer le scénario thermique de toute masse d'eau au STI.

En résumé, c'est l'évolution de la température de surface dans le temps qui est le reflet du degré de maturité de l'eau et non pas la température de surface seule isolée de son contexte hydrologique passé. Nous associons la présence d'eaux froides issues d'une remontée d'eaux infra-thermoclinales, suivie d'une maturation de ces eaux pendant cinq semaines et de la stabilisation thermique pendant une à deux semaines avec la production d'animaux fourrage pour les thons. A l'issue de cette évolution thermique idéale, la zone sera favorable à la présence de thons.

C'est en partant du principe de l'analyse du passé hydrologique d'une masse d'eau que le modèle prévisionnel PREVI-PECHE développé par Stretta et Slepoukha (1983; 1983a) définit des zones favorables à la présence de thons dans l'Atlantique tropical oriental.

3.4.3. PREVI-PECHE ou le calcul de la Potentialité de Pêche d'une Zone (PPZ)

Pour calculer des potentialités de pêche en Atlantique, nous avons divisé la région inter-tropicale entre 20° N et 10° S et entre la côte africaine et 50° W en 138 zones de 2° latitude par 5° longitude soit des zones d'une superficie de 36 000 miles^2 (figure 5). Ce découpage a été adopté pour respecter les échelles de corrélations observées pour les paramètres de surface tels la température de surface (Merle, 1977).

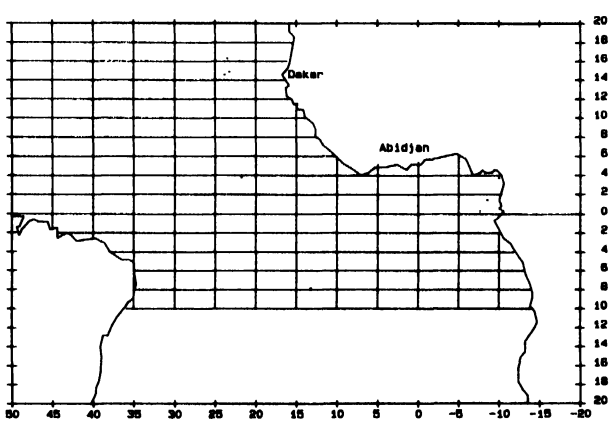


Figure 5. Découpage de l'océan Atlantique tropical entre 20°N et 10°S et entre la côte africaine et 50°W en 138 zones de 2° latitude par 5° longitude

Dans la pratique, dès la réception d'une carte de température (cartes GOSSTCOMP ou METEOSAT), nous extrayons les valeurs thermiques de 138 zones en « digitalisant » manuellement, c'est-à-dire que l'on prend dans la zone de 2° de latitude par 5° de longitude la température prépondérante. Les valeurs thermiques sont saisies et ensuite nous lançons le programme interactif de calcul des potentialités de pêche et d'impression du « BULLETIN PREVISIONNEL ». Le calcul de la Potentialité de Pêche d'une Zone (PPZ) est présenté en annexe.

Ce « BULLETIN PREVISIONNEL » est immédiatement remis aux patrons des thoniers à quai sur le port d'Abidjan et aux représentants des armements. Ces derniers diffusent par radio à la flottille en pêche, lors des vacations radios, la liste des zones très favorables et moyennement favorables à la pêche.

3.5. Limites et bilan de PREVI-PECHE

Nous sommes parfaitement conscients que le modèle prévisionnel que nous avons développé est imprécis : en particulier, il est un phénomène que nous maîtrisons mal à savoir celui des courants. Une zone qui subit un important enrichissement en plancton végétal et animal va, sous l'influence des courants, fertiliser une ou plusieurs zones en aval du courant.

Auprès des pêcheurs, le succès de PREVI-PECHE a été immédiat malgré les aléas des délais postaux qui faisaient que parfois il nous arrivait de rester deux ou même plus de trois semaines sans pouvoir diffuser un bulletin prévisionnel.

Quant au degré de fiabilité de notre modèle prévisionnel, nous avons pu à partir des fichiers des prises de thonidés de la flottille FIS comparer, de janvier 1982 à juillet 1983, les zones où il y a eu de la pêche et les zones que nous avions définies comme très favorables, moyennement favorables ou encore en évolution favorable. Durant ces dix-huit mois, nous avons publié 50 « BULLETIN PREVISIONNEL », dans lesquels nous avons signalé, de 20° N à 10° S et jusqu'à 50° W, 65 zones très favorables. Parmi ces zones signalées, seulement 25 ont été prospectées par des thoniers et 19 d'entre elles ont été le siège de pêche. Ce qui donne un coefficient de fiabilité de 76,0 %. Pour la détermination des zones moyennement favorables, notre coefficient de fiabilité est de 64,3 %. Quant aux zones en évolution favorable, notre coefficient de fiabilité est de 71,2 %.

Il est évident que nous n'avons pas prévu toutes les zones de pêche; en régime côtier notamment la prévision reste difficile voire impossible en raison du manque de fiabilité des données thermiques dans les zones côtières. Autre exemple, en 1982, la zone de pêche qui s'est déroulée dans la région de la crête thermique entre 2° et 4° sud a complètement échappé aux prévisions du modèle.

En conclusion, on peut souligner le fait que la traduction par un modèle empirique d'un système naturel en évolution ne doit pas nous faire perdre de vue qu'il est difficile (et hasardeux ?) de traduire toutes les multiples interactions qui existent entre les différents éléments d'un écosystème. Cette nouvelle forme d'analyse qui s'inspire de la théorie dynamique des systèmes à l'avantage de ce fait, selon Bertalanffy (1968), de coller à la réalité tout en manquant d'élégance mathématique et de puissance déductive; c'est pas essence une analyse empirico-intuitive. Comme le fait remarquer cet auteur, les premières versions d'un nouveau paradigme sont souvent assez grossières et les solutions obtenues sont loin d'être parfaites. Comme le souligne Rigler (1982), l'empirisme en écologie est une branche à haut risque mais très porteuse.

Nous avons vu plus haut (§ 3.3.2.) que le modèle prévisionnel PREVI-PECHE est bâti sur une analyse empirique des conditions hydrologiques de surface associées à des concentrations de thonidés. La clé caractéristique d'une théorie empirique est qu'elle n'est faite que pour des prévisions (Rigler, 1982). Il existe à présent une approche nouvelle pour modéliser des connaissances dans un domaine particulier : les systèmes experts (SE). Les SE utilisent essentiellement des méthodes empiriques qui reposent sur une connaissance heuristique permettant de trouver la meilleure solution et non pas la solution optimale.

Le but d'un SE est « la modélisation du comportement d'un expert humain, accomplissant une tâche de résolution de problèmes pour laquelle on ne dispose d'aucun algorithme et ce dans un domaine bien précis (Dincbas, 1983).

La structure d'un SE est organisée autour de deux principaux éléments : une base de connaissance et un moteur d'inférence qui utilise le contenu de cette base. Chatain et Dussauchoy (1987) précisent qu'en ce qui concerne la base de connaissance :

- *« les éléments qui la constituent sont indépendants les uns des autres;*

– *l'ordre dans lequel ces éléments sont introduits dans le système n'a pas d'influence sur les résultats;*

– *et contrairement à la programmation classique, la modification d'un de ces éléments n'a pas de conséquences catastrophiques sur le déroulement du programme ».*

Citant toujours Chatain et Dussauchoy (1987), les SE ont la particularité de manipuler des connaissances essentiellement de nature symbolique par opposition aux données numeriques utilisées par les programmes classiques.

Si le SE acquiert la connaissance spécialisée auprès d'un expert et l'enregistre dans sa base de connaissance, se pose alors le problème du choix de l'expert. Dans le cas de la pêche thonière, on pourrait avoir le choix entre deux types d'expert : l'halieute ou le pêcheur. Si l'on privilégie l'analyse des conditions hydrologiques de surface associées à des concentrations de thonidés, l'expert sera l'halieute; en revanche on pourrait imaginer un SE dans lequel le pêcheur aidé en cela par un cogniticien transférerait ses connaissances vers le SE. Une solution mixte serait sans doute la plus souhaitable. Chatain et Dussauchoy (1987) distinguent cinq étapes pour établir un SE :

– L'identification du problème. Le rôle du cogniticien sera de formaliser les pratiques empiriques des deux types d'expert (halieute ou pêcheur).

– La conceptualisation. Cette phase consiste à déterminer les concepts clés et les relations existantes entre ces concepts.

– La formalisation : c'est-à-dire l'organisation des concepts.

– L'implantation du SE et la mise en place d'un prototype.

– La validation pour évaluer les performances et la base de connaissance.

Le transfert du savoir de l'expert est un processus long et incrémentiel constitué d'échanges constants entre l'expert et le cogniticien. Chatain et Dussauchoy (1987) estiment qu'il faut au minium deux années pour bâtir un SE.

Un des problèmes majeurs (et peut-être une limite ?) dans le développement d'un SE est celui de l'extraction des connaissances surtout quand on s'adresser à des phénomènes biologiques.

4. CONCLUSIONS

Les études classiques de l'environnement des thonidés qui débutèrent dans le golfe de Guinée vers la fin des années 60 (en même temps que la pêche industrielle), qui se sont poursuivies dans les années 70 par des recherches sont le support de recherches appliquées utilisant des méthodes originales. Ces études ont permis de poser les premices d'une recherche halieutique opérationnelle au cours de la décennie 80. Loin de se laisser enfermer dans le cadre purement technique de nouvelles méthodes et, soucieux de valoriser des résultats collectés à l'issue de prospection et de contact avec les pêcheurs, nous estimons que la création d'une cellule de consultance en matière de previsions de pêche et d'évaluation du potentiel halieutique d'une zone pouvait être raisonnablement envisagee pour la nouvelle decennie.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anonyme (1986. – Rapport de la conférence ICCAT sur le Programme de l'Annee Internationale du Listao. pp. : 13-22. *In* Proceedings of the ICCAT Conference ont the International Shipjack Program. (P.E.K. Symons, P.M. Miyake and G.T. Sakagawa Editors) ICCAT 388 pp.

Bertalanffy L. Von (1968). – Theorie generale des systemes. DUNOD (Paris) : 296 pp.

Blackburn M. (1965). – Oceanography and the ecology of tunas. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 3 : 299,322.

Chatain J.-N. et A. Dussauchoy (1987). – Systemes experts. Methodes et outils. Editions Eyrolles (Paris). 279 pp.

Citeau J., J.-Y. Le Gall et R. Pianet (1981). – Le satellite METEOSAT et la flottille thoniere intertropical. La Pêche Maritime. N° 1245. Decembre 1981 : 740-744.

Citeau J., B. Guillot et R. Lae (1984). – Opération LISTAO : Reconnaissance de l'environnement physique en Atlantique intertropical a l'aide des satellites METEOSAT et GOES-E. Inititations - Documentations Techniques N° 63 (Teledetection 10) : 28 pp. Editions ORSTOM.

Citeau J., B. Guillot, R. Lae, M. Slepoukha et J.M. Stretta (1986). – Opération Listao et télédétection : bilan d'une opération. pp. : 363. *In* Proceedings of the ICCAT Conference ont the International Skipjack Program. (P.E.K. Symons, P.M. Miyake and G.T.T Sakagawa Editors) ICCAT 388 pp.

Dandonneau Y. (1972). – Etude du phytoplancton sur le plateau continental de Côte d'Ivoire. II Représentativité de l'eau de surface pour la description et l'interprétation des phénomènes dynamiques. Cah. ORSTOM, sér. Océanogr., Vol X (3) : 267-274.

Delclaux P. (1978a). — Aide a la pêche. Notice d'utilisation des programmes. Rapport CNES. CT/EMT/MT/AT/N° 558. Décembre 1978. 37 pp.

Delclaux P. (1978b). — Aide a la pêche. Description de la chaine de traitement. Rapport CNES. CT/EMT/MT/AT/N°559 Decembre 1978. 61 pp.

Dincbas M. (1983). — Contribution a l'étude des Systemes Expert. These ENSAE 1983.

Dufour P. et J.-M. Stretta (1973). — Fronts thermiques et thermohalins dans la region du Cap Lopez (Golfe de Guinee) en juin-juillet 1972 : phytoplancton, zooplancton, micronecton et peche thoniere. Doc. Sci. Centre Rech. Oceanogr. Abidjan Vol IV (3) : 99-142.

Hastenrath S. and P.J. Lamb (1977). — Climatic atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific oceans. The University of Wisconsin Press, 112 pp.

Herbland A., R. Le Borgne, A. Le Bouteiller et B. Voituriez (1983). — Structure hydrologique et production primaire dans l'Atlantique tropical oriental. Oceanogr. trop. vol 18 (2) : 249-293.

Le Borgne R. (1977). — Etude de la production pelagique de la zone equatoriale de l'Atlantique a 4° W. II - Biomasse et peuplements du zooplancton. Cah. ORSTOM., ser. Oceanogr. Vol XV(4) : 333-349.

Marsac F., M. Petit et J.-M. Stretta (1987). Radiometrie aerienne et prospection thoniere a l'ORSTOM. Methodologie. Bilan et Perspective. Initiations et Documents Techniques n° 68. (Teledetection 12). 33 pp. Editions ORSTOM.

Mendelsshon R. and C. Roy (1986). — Environmental influences on the F.I.S.M. tuna catches in the gulf of Guinea. pp. : 170-188. *In* Proceedings of the ICCAT Conference on the International Skipjack Program. (P.E.K. Symons, P.M. Miyake and G.T. Sakagawa Editors) ICCAT 388 pp.

Merle J. (1977. — Seasonal variations of temperature and circulation in the upper layer of the equatorial Atlantic Ocean (GATE Area). GATE Workshop, Miami, FL, February 28 to March 10, 1977.

Merle J. (1978). — Atlas hydrologique saisonnier de l'ocean Atlantique intertropical. Travaux et Documents de l'ORSTOM. n :82. 134 pp.

Miyabe N. and F.X. Bard (1986). — Movements of Skipjack in the eastern Atlantic, from results of tagging by Japan. pp. 342-347. *In* Proceedings of the ICCAT Conference on the International Skipjack Program. (P.E.K. Symons, P.M. Miyake and G.T. Sakagawa Editors) ICCAT, 388 p.

Petit M. (1986). — Coherent theory on tuna behavior. 35th Tuna Conference. Lake Arrowhead. May 1986. NMFS La Jolla.

Rigler F.H. (1982). — The relation between fisheries management and limnology. Transactions of the American Fisheries Society. Vol 111 (2) : 121-132.

Stretta J.-M. (1977). — Temperature de surface et pêche thonière dans la zone frontale du cap Lopez (Atlantique tropial oriental) en juin et juillet 1972, 1974 et 1975. Cah. ORSTOM ser. Oceanogr., Vol. XV (2) : 163-180.

Stretta J.-M. (1985). — Description et mode d'emploi de la chaine d'analyse des paramètres ecologiques associes a la pêche thonière. Note à Diffusion Restreinte Cent. Rech. Océanogr. Abidjan 04/85 : 26 pp.

Stretta J.-M. (1988). — Environnement et pêche thonière en Atlantique tropical oriental. pp : 269-316. *In* Ressources, pêche et biologie des thonidés tropicaux de l'Atlantique centre-est. (FONTENEAU A. et J. MARCILLE Eds). FAO Doc. Tech. Pêches, (292) : 391 pp.

Stretta J.-M., J. Noël et J.-C. Le Guen (1973). — Mesures de temperature de surface par radiométrie aerienne et concentrations de thons au large d'Abidjan en août 1973. Document Multigr. CRO Abidjan, 16 pp.

Stretta J.-M., J. Noël et L. Vercesi (1977). — Caracterisation des situations hydrobiologiques et potentialités de pêche thoniere au Cap Lopez en juin et juillet 1972, 1974. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Abidjan Vol VI(2) : 59,74.

Stretta J.-M. et B. Surugue (1977). — Temperature de surface et pêche thoniere. Film 16 mm, couleurs, son optique, 7 minutes, version française, anglaise, portugaise, arabe. (Disponible en video U Matic 3/4 pouce) Production ORSTOM, Diffusion ORSTOM, SFRS, Mediathèque Centrale, ADPF.

Stretta J.-M., J.-C. Favard et J. Citeau (1980). — METEOSAT et l'experience d'aide a la pêche. Compte rendus du 6° Symposium canadien sur la teledétection 21-31 mai 1980, Halifax, Canada.

Stretta J.M. et M. Slepoukha (1983). — Les satellites, l'ordinateur et l'aide a la pêche. La Pêche Maritime janvier 1983. N° 1258 : 38-41.

Stretta J.-M. et M. Slepoukha (1983a) — Analayse des temperatures de surface au sein des concentrations de listao en 1981. ICCAT, Doc. SKJ. Conf. 83/41.

Stretta J.-M. et M. Slepoukha (1986). — Analyse des facteurs biotiques et abiotiques associes aux bancs de listaos. pp. 161-169. *In* Proceedings of the ICCAT Conference on the International Skipjack Program. (P.E.K. Symons, P.M. Miyake and G.T. Sakagawa Editors) ICCAT, 388 p.

Stretta J.-M. et M. Petit (A paraitre). — L'environnement des thonides au large de la Côte d'Ivoire. *In* Synthèse Maritime Côte d'Ivoire. Editions ORSTOM.

Sund P.N., M. Blackburn and F. Williams (1981). — Tunas and their environment in the Pacific Ocean : a review Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 19 : 443,512.

Valiela (1984). — Marine ecological processes. Springer Advanced Texts in Life Sciences (D.E. Reichle, Ed.). Springer-Verlag. 546 pp.

Viollier M. (1976). — Contribution a l'etude du rayonnement retrodiffuse par l'ocean : application a la teledetection de la chlorophylle. These doctorat de spécialites. Universite des Sciences et Techniques de Lille. N° 610. 90 pp.

Voituriez B. et Y. Dandonneau (1974). — Relations entre la structure thermique, la production primaire et la regeneration des sels nutritifs dans le dome de Guinee. Cah. ORSTOM. ser. Oceanogr., Vol XIII : 245-255.

Voituriez B. et A. Herbland (1977). — Etude de la production pelagique de la zone equatoriale de l'Atlantique a 4° W.I-Relations entre la structure hydrologique et la production primaire. Cah. ORSTOM. ser. Oceanogr., vol XV, n° 4, 1977 : 313-331.

Voituriez B. et A. Herbland (1982). — Comparaison des systemes productifs de l'Atlantique Tropical Est : dômes thermiques, upwellings côtiers et upwelling équatorial. Rapp. P.-V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer, 180 : 114,130.

Yentsch C.S. (1973). — Remote sensing for productivity in pelagic fischeries. Nature Vol. 224 (5415) : 307-308.

6. ANNEXE

6.1. PREVI-PECHE ou le calcul de la potentialité de pêche d'une zone (PPZ)

Comme nous l'avons vu plus haut, pour calculer des potentialités de pêche en Atlantique, nous avons divisé la région inter-tropicale entre 20°N et 10°S et entre la

côte africaine et 50°W en 138 zones de 2° latitude par 5° longitude soit des zones d'une superficie de 36 000 miles² (figure 5).

A la réception d'une carte des températures de surface de la mer mesurées par satellite (cartes GOSSTCOMP ou carte METEOSAT), nous sommes à la semaine S0. Cette semaine correspond au mois M. Pour chaque zone, nous calculons :

– la Potentialité Historique de Pêche (PHP);
– la Potentialité de Pêche en Cours (PPC);
– la Potentialité de Pêche d'une Zone (PPZ) qui est égale à la somme entre la PHP et la PPC;
– l'Evolution de la Probabilite de Pêche (EPP).

6.1.1. Potentialité historique de pêche (PHP)

Pour le calcul de la PHP, nous retiendrons differentes données thermiques relevées dans l'atlas compilé par Hastenrath et Lamb (1977); Merle, (1978). Ces temperatures historiques utilisées sont :

– la température historique du mois M : (THM);
– la temperature historique du mois precedent (THM1);
– la temperature historique du mois suivant (THMS);
– la temperature historique la plus froide (THF) relevee dans la zone.

En calculant dans la zone etudiee la difference thermique entre la temperature historique la plus froide (THF) relevée et la température historique du mois precédent celui ou débute l'analyse des temperatures de surface (THM1), il est possible d'apprecier de façon théorique et globale un certain niveau de productivite de la masse d'eau étudiee. Plus la productivite de la masse d'eau est elevée, plus la propabilité de pêche theorique est élevee. Dans cette notion de PHP, nous ne faisons pas intervenir les pêches de thonides dont la zone étudiée a pu être l'objet dans le passe.

La PHP resulte de la comparaison entre la temperature de surface de la mer historique relevee le mois précédent celui ou débute l'analyse des temperatures de surface et la temperature la plus froide relevee au cours de l'année dans la zone (THF). Si la température la plus froide relevée au cours de l'année dans la zone est supérieure à 25°C, on considère cette zone comme ayant peu de chances d'être enrichie par des remontées d'eaux infra-thermoclinales. La PHP est égale a 0/1. En revanche, la PHP est égale a 1/1 si la THF est inférieure à 25°C et si le mois où elle apparait est situé le mois precédent celui de la reception de la dernière carte de temperature.

En resumé :

– si THF > 25.0°C alors PHP = 0/1
– si THF < 25.0°C et THF = THM1 alors PHP = 1/1.

C'est à partir de la dernière carte reçue (S0) que nous allons à présent analyser le scenario thermique de la zone depuis cinq semaines.

6.1.2. Potentialité de Pêche en Cours (PPC)

Quand l'on reçoit une carte de température de surface de la mer élaborée à partir des données de METEOSAT ou de la NOAA, nous sommes a la semaine S0 et la temperature de surface est TS0.

Pour une zone étudiée, apres le calcul de la PHP, nous analysons l'evolution de la température de surface fournie par les cartes satellites sur une période de cinq semaines. Nous batissons le scénario thermique de la zone étudiee des semaines S-5 a S0 et le comparons au scénario thermique idéal par une série de cinq tests. A l'issue de cette analyse, nous obtenons la potentialité de pêche en cours (PPC) pour la zone étudiee.

6.1.3. La Potentialité de Pêche d'une Zone (PPZ)

Nous avons vu ci-dessus que la potentialité de pêche d'une zone est egale a la somme de la PHP et de la PPC : le modèle accorde à la zone étudiee une valeur de probabilité de pêche comprise entre 0 et 6. La PHP participe a la potentialité de pêche d'une zone a hauteur de 1/6 et la PPC à hauteur de 5/6. Une probabilité de pêche égale a 0 ou 1 definit une zone theoriquement défavorable à la presence de thons : en revanche, une probabilite de pêche etale a 5 ou 6 définit une zone théoriquement très favorable à la pêche. Les valeurs intermediaires définissent des zones favorable (valeur egale a 4), moyennement favorable, (valeur egale a 3) a la pêche ou peu favorable (valeur égale à 2) a la pêche. Cette probabilite de pêche ainsi calculee est valable pour une periode de dix à quinze jours apres le dernier releve thermique soit pour les seamines S+1 et S+2.

6.1.4. Evolution de la Probabilité de Pêche (EPP)

Pour s'affranchir du retard dans la reception des cartes de temperature mesurees par satellites en provenance des USA pour les cartes GOSSTCOMP, nous nous livrons a une projection dans l'avenir. Pour cela, nous calculons de nouvelles probabilites de pêche en fonction d'une evolution possible de la temperature lors de la semaine S+1 que nous n'avons pas encore reçue. Cette projection dans l'avenir permet d'evaluer les potentialites de pêche d'une zone trois semaines a un mois apres les dernieres informations thermiques reçues. Au cours de ce nouveau traitement, le modele previsionnel analyse et propose differents scenarios thermiques. Afin de faire varier la temperature de surface de la semaine S+1 dans une gamme plausible, nous allons calculer son intervalle de variation. Pour cela nous prenons la valeur absolue de la difference entre la température de surface de la semaine S0 et la temperature de surface historique du mois suivant le mois correspondant a la semaine S0 (THMS). A cette valeur absolue nous ajoutons 1°C pour ne pas négliger d'eventuelles variations des conditions de surface.

La température de surface de la semaine S+1 variera entre :

$|TS0 - THMS| + 1$ et $- |TS0 - THMS| + 1$.

Cette variation est limitee à plus ou moins 2°C. En Atlantique intertropical, des variations de la temperature de surface supérieures à 2°C sont rares sauf en région d'upwelling.

Pourqu'une zone soit déclarée « EN EVOLUTION FAVORABLE », il faut que la première probabilité de pêche (celle issue du scénario thermique entre les

semaines S0 et S-4) soit égale ou inférieure a 1/6 et que les cinq probabilités de pêche issues des scénario thermiques entre les semaines S+1 et S-3 soient superieures ou egales à 3/6.

Prenons un exemple concret (Stretta et Slepoukha, 1983) : « Dans le bulletin prévisionnel n° 28 (figure 6) du 4 octobre 1982, le modèle avait qualifié la zone 48 de zone moyennement favorable. Si l'on n'avait pas calcule les différentes probabilites de pêche en fonction d'une evolution possible de la temperature dans le temps on pourrait voir sur la figure 7 que la probabilité de pêche pour la periode du 15 septembre au 28 septembre 1982 était de 1/6 c'est-a-dire que cette zone était consideree comme defavorable. Cependant, dans le cas de la zone 48, en calculant une évolution possible de la temperature, la probabilité de pêche passe de 1/6 a 3 ou même 4/6 pour la période du 29 septembre au 12 octobre 1982 : la zone devenant ainsi moyennement favorable. En fait, la masse d'eau etait en cours de maturation et le processus de fertilisation, tout en n'étant pas exceptionnel, etait cependant suffisamment avance pour ne pas être perturbe par une evolution possible de la temperature de surface ».

« Prenons à present l'exemple de la zone N° 13 : on peut voir sur le texte sorti de l'imprimante (figure 7) que les probabilités de pêche calculees pour les differents scenarios thermiques sont egales a 0/6 ou 1/6. Quelle que soit l'evolution de la temperature de surface de cette zone, la potentialite de pêche pour la quinzaine suivante est theoriquement nulle. Dans le cas, la masse d'eau n'avait subi aucune fertilisation au cours des six dernieres semaines et une evolution possible de la température n'y pourrait rien changer ».

MINISTERE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE D'OUTRE MER

CENTRE DE RECHERCHES OCEANOGRAPHIQUES
BP V 18 ABIDJAN COTE D'IVOIRE

BUREAU D'AIDE A LA PECHE ORSTOM/INTERTHON

BULLETIN N:28 DU 4/10/1982

Ref. 1583/JMS/hp

****
* PROBABILITES DE PECHE THONIERE *
* EN ATLANTIQUE INTERTROPICAL *
****

PROBABILITES VALABLES POUR LA PERIODE DU: 29/9 AU 12/10/1982

Probabilités de pêche calculées à partir de températures de surface mesurées par satellite
Origine des données NOAA (USA)

ZONES TRES FAVORABLES

81 82 108

ZONES MOYENNEMENT FAVORABLES

40 48 58 59 60 62 69 72 73 80 84 86 87 91 94
95 96 105 106 107 115 120 128 132 137

ZONES PEU FAVORABLES

4 18 27 28 35 39 42 43 49 50 55 63 68 74 75
83 92 93 97 98 101 102 103 104 110 111 112 113 121 124
130 131 133 134 135 138

ZONES EN EVOLUTION FAVORABLE

58 73 86 95 105 137

PAS D'INFORMATION EXPLOITABLE POUR LES AUTRES ZONES
PREVISIONS FAITES PAR J.M. STRETTA ET M. SLEPOUKHA sur ordinateur HP/100
avec le logiciel PREVI-PECHE

Figure 6. Reproduction du « BULLETIN PREVISIONNEL n° 28 » distribue aux pecheurs le 4 octobre 1982

« Dans l'exemple de la zone n° 108, on peut voir sur le texte sorti de l'imprimante (figure 7) que la probabilite de pêche reste stationnaire et elevee quelle que soit l'evolution de la temperature de surface. Cependant, au sein de cette zone, nous savons que la rencontre d'épaves est possible (Stretta, 1985; Stretta et Slepoukha, 1986). Ce facteur qui reste aléatoire et non quantifiable n'est pas a negliger, surtout lorsque la probabilite de pêche est elevee. C'est pourquoi la zone est qualifiee de très favorable a la pêche ».

Dans le bulletin prévisionnel n° 28 (figure 6) du 4 octobre 1982, la zone 73 est qualifiee de zone en EVOLUTION FAVORABLE. On peut voir sur le texte sorti de l'imprimante (figure 7) que la première probabilité de pêche (celle issue du scenario thermique entre les semaines S0 et S-4) est egal à 0 et que les probabilites de pêche issues des scenarios thermiques entre les semaines S+1 et S-3 sont egales a 3/6 ou 4/6.

PROBABILITES DE PECHE ET EVOLUTION
POUR L'ATLANTIQUE INTERTROPICAL
BULLETIN N:28

****

PREVISIONS FAITES PAR J.M. STRETTA ET M. SLEPOUKHA
BUREAU D'AIDE A LA PECHE ORSTOM/INTERTHON ABIDJAN LE:4/10/82

NUMERO DE LA ZONE : 13 TEMPERATURE HISTORIQUE : 26.0
LA DERNIERE CARTE THERMIQUE RECUE COUVRE LA PERIODE DU:8/9 AU 14/9/82
TEMPERATURE DE SURFACE DANS CETTE ZONE A CETTE PERIODE: 23.0C
PROBABILITE DE PECHE POUR LA PERIODE DU:15/9 AU 28/9/82 : 0/6
*****
EVOLUTION DE LA PROBABILITE DE PECHE DANS CETTE ZONE
POUR LA PERIODE DU:29/9 AU 12/10/82 SI LA TEMPERATURE
DU 15/9 AU 21/9/82 SE TROUVE ETRE EGALE A:
25.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 0/6
24.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 1/6
23.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 0/6
22.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 0/6
21.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 0/6

NUMERO DE LA ZONE : 48 TEMPERATURE HISTORIQUE : 27.0
LA DERNIERE CARTE THERMIQUE RECUE COUVRE LA PERIODE DU:8/9 AU 14/9/82
TEMPERATURE DE SURFACE DANS CETTE ZONE A CETTE PERIODE: 26.0C
PROBABILITE DE PECHE POUR LA PERIODE DU:15/9 AU 28/9/82 : 1/6
*****
EVOLUTION DE LA PROBABILITE DE PECHE DANS CETTE ZONE
POUR LA PERIODE DU:29/9 AU 12/10/82 SI LA TEMPERATURE
DU 15/9 AU 21/9/82 SE TROUVE ETRE EGALE A:
28.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 3/6
27.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6
26.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 3/6
25.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 3/6
24.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 3/6

NUMERO DE LA ZONE : 108 TEMPERATURE HISTORIQUE : 23.0
LA DERNIERE CARTE THERMIQUE RECUE COUVRE LA PERIODE DU:8/9 AU 14/9/82
TEMPERATURE DE SURFACE DANS CETTE ZONE A CETTE PERIODE: 21.0C
PROBABILITE DE PECHE POUR LA PERIODE DU:15/9 AU 28/9/82 : 4/6
*****
EVOLUTION DE LA PROBABILITE DE PECHE DANS CETTE ZONE
POUR LA PERIODE DU:29/9 AU 12/10/82 SI LA TEMPERATURE
DU 15/9 AU 21/9/82 SE TROUVE ETRE EGALE A:
23.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6
22.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 5/6
21.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6
20.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6
19.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6

NUMERO DE LA ZONE : 73 TEMPERATURE HISTORIQUE : 24.0
LA DERNIERE CARTE THERMIQUE RECUE COUVRE LA PERIODE DU:8/9 AU 14/9/82
TEMPERATURE DE SURFACE DANS CETTE ZONE A CETTE PERIODE: 23.0C
PROBABILITE DE PECHE POUR LA PERIODE DU:15/9 AU 28/9/82 : 0/6
*****
EVOLUTION DE LA PROBABILITE DE PECHE DANS CETTE ZONE
POUR LA PERIODE DU:29/9 AU 12/10/82 SI LA TEMPERATURE
DU 15/9 AU 21/9/82 SE TROUVE ETRE EGALE A:
21.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6
22.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 3/6
23.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6
24.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6
25.0C LA PROBABILITE DE PECHE DEVIENDRAIT EGALE A: 4/6

Figure 7. Sortie de l'imprimante montrant les probabilites de peche calculees.

5.4 Pêcheries de thons tropicaux de l'océan Indien occidental

Francis MARSAC
Antenne ORSTOM
Victoria-Mahé Seychelles

I. – SOURCE DES DONNEES

Ce chapitre confronte des données de pêche et des observations sur le milieu océanique. Les donnees de pêche proviennent des bases constituées par l'ORSTOM (Antenne des Seychelles) et la Seychelles Fishing Authority (SFA), à partir de livres de bord des thoniers senneurs français, ivoiriens, espagnols et mauricien operant dans la région. L'ensemble des informations couvrant la periode 1983-1986 est utilisé dans la premiere partie du chapitre, sur une base trimestrielle. La seconde partie, qui s'interesse aux relations entre rendements de pêche et conditions de surface, requiert des statistiques fines et seules les données françaises et ivoiriennes seront traitees (1983-1986). Les observations sur l'environnement, limitées à la température de surface et au vent, proviennent egalement des livres de bord français et ivoiriens.

II. – DISTRIBUTION DES PRISES ET DES RENDEMENTS DES SENNEURS INDUSTRIELS

Les résultats des captures et des prises par unite d'effort (PUE) obtenues par les senneurs industriels sont rassemblees dans les tableaux 1 a 3, et leur distribution trimestrielle représentee dans les figures 1 et 2.

Les cartes trimestrielles mettent bien en evidence le déplacement saisonnier de l'activité de pêche de ces premières annees d'exploitation, les Seychelles (4°30'S, 55°E) se trouvant quasiment au centre geographique de la pêcherie.

Durant le premier trimestre, les flottilles se concentrent dans l'est des Seychelles, entre 60°E et 65°E et entre 3°S et 5°S. Il est interessant de noter que cette zone est alors traversee d'ouest en est par le contre-courant équatorial sud. Les prises sont principalement constituées d'albacore (69 %), et l'activité de pêche est prédominante sur les mattes libres (78 % des prises). Plus au sud, la zone frontière entre le courant équatorial sud et le contre-courant déjà cité, siège d'un dôme de la thermocline (de 8°S à 10°S), constitue par endroits un secteur de fortes captures. Pendant ce trimestre, les PUE obtenues sont relativement homogènes et la moyenne sur les quatre années examinées s'établit à 13,9 t/j.

Tableau 1 : Prises totales (en tonnes) des flottilles française, ivoirienne, espagnole et mauricienne, dans l'ocean Indien occidental, de 1983 à 1986.

	TRIM 1	TRIM 2	TRIM 3	TRIM 4	TOTAL
1983	4 345	3 373	2 506	11 976	22 200
1984	19 204	17 989	23 994	45 473	106 660
1985	35 286	23 470	30 328	39 525	128 609
1986	40 033	26 906	38 062	38 098	143 099
TOTAL	98 868	71 738	94 890	135 072	400 568

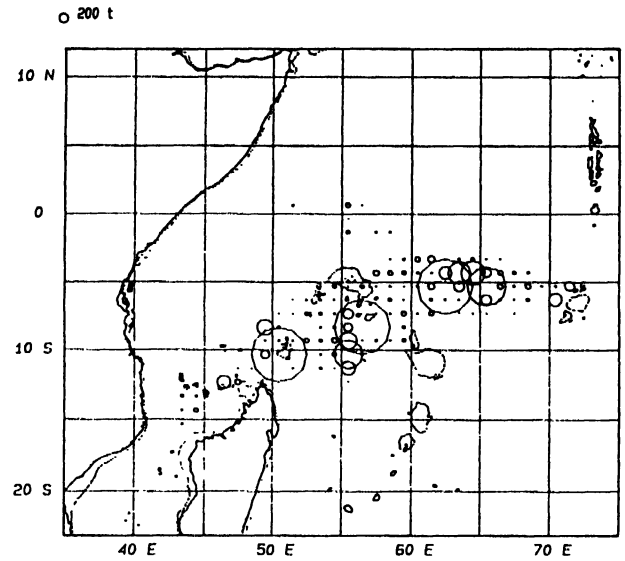
Tableau 2 : Prises d'albacore et de listao (en tonnes) des flottilles française, ivoirienne et mauricienne, dans l'ocean Indien occidental, de 1983 à 1986.

	TRIM	TRIM 2	TRIM 3	TRIM 4	TOTAL
1983	1 388	886	1 397	6 984	10 655
1984	13 827	10 552	9 815	19 407	53 601
1985	25 688	14 281	10 201	9 512	59 682
1986	27 530	5 320	14 381	9 551	56 782
TOTAL	68 433	31 039	35 794	45 454	180 720
1983	2 150	1 708	594	3 737	8 189
1984	3 305	5 605	11 682	21 095	41 687
1985	9 555	8 890	20 126	29 675	68 246
1986	12 006	21 551	22 987	27 690	84 234
TOTAL	27 016	37 754	55 389	82 197	202 356

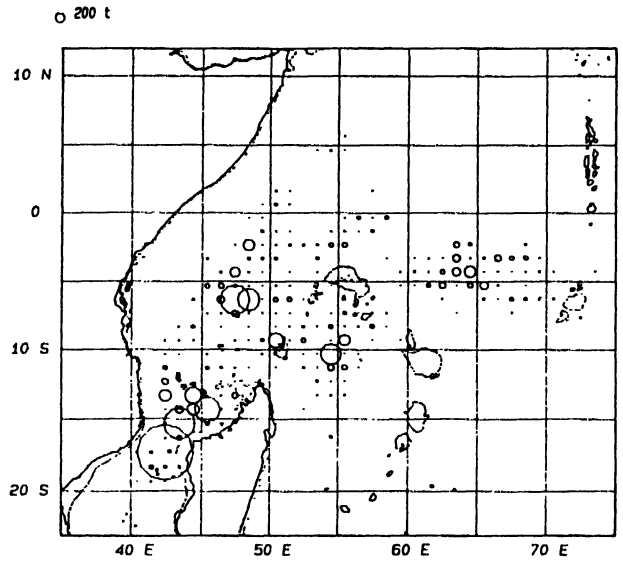
Tableau 3 : Prises par unite d'effort (en tonnes/jour de pêche) des flottilles française, ivoirienne, espagnole et mauricienne, dans l'ocean Indien occidental, de 1983 à 1986.

	TRIM 1	TRIM 2	TRIM 3	TRIM 4	MOYENNE
1983	14.5	10.2	7.6	15.4	12.8
1984	18.3	8.6	11.8	16.5	13.4
1985	11.3	9.3	17.4	15.0	12.8
1986	15.3	12.3	18.1	15.6	15.3
MOYENNE	13.9			15.7	13.8

Les plus faibles niveaux de prises et de P.U.E. sont enregistrés au cours du second trimestre (71 700 t et 10,1 t/j). L'activite de pêche couvre une large zone

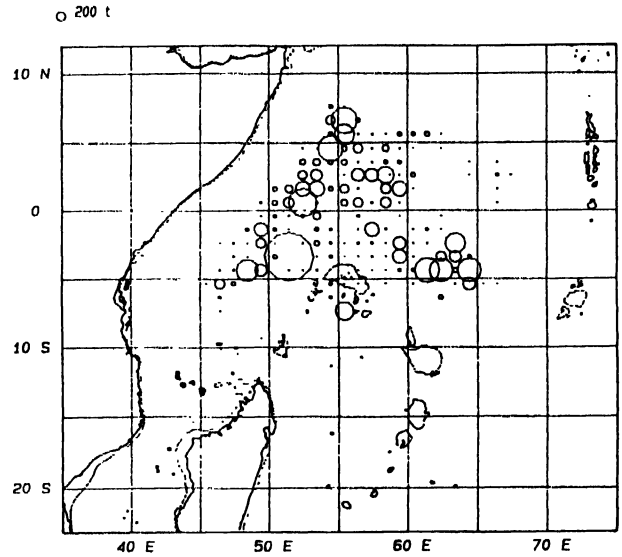


a) trimestre 1

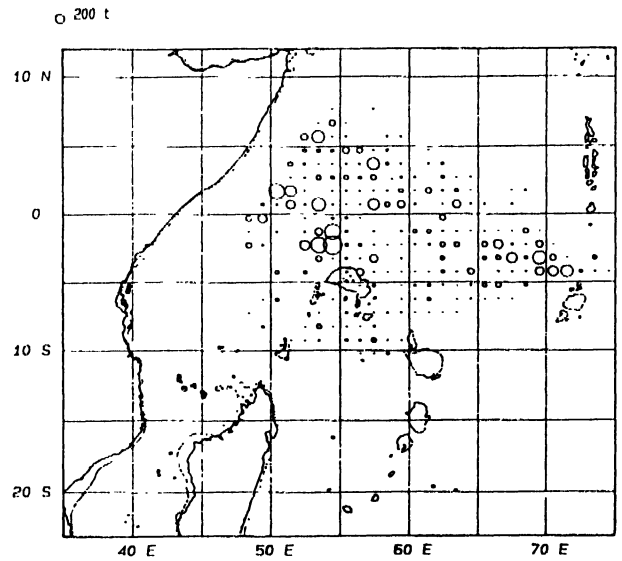


b) trimestre 2

Fig. 1 — Repartition par degre et par trimestre des prises (en tonnes) des thoniers senneurs industriels dans l'Ocean Indien occidental, de 1983 a 1986.



c) trimestre 3



d) trimestre 4

Fig. 1 (suite)

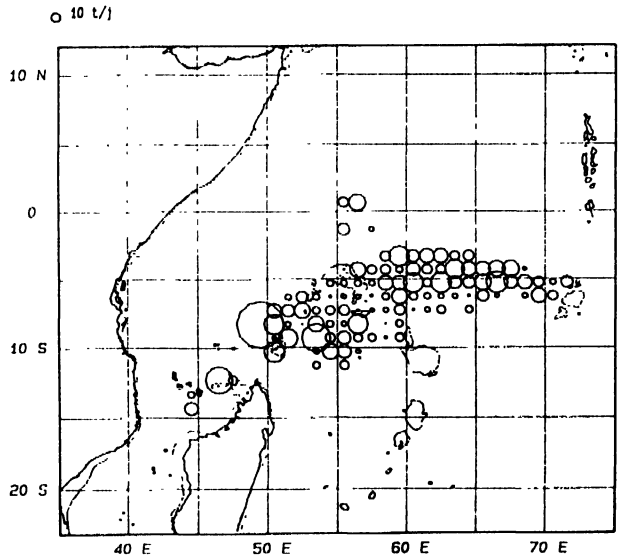
allant de l'équateur a 13°S dans l'est de Madagascar et jusqu'à 24°S dans le canal de Mozambique, et de 40°E à 70°E. Les plus fortes prises et P.U.E. sont obtenues principalement dans le canal de Mozambique, a la fois autour d'épaves dérivantes et sur des mattes libres. Le listao devient predominant par rapport a l'albacore.

Au cours du troisième trimestre, les prises totales augmentent de nouveau, de même que les PUE qui depassent leur niveau du premier trimestre (15,3 t/j). Les zones de pêche se situent alors de 7°N à 5°S, à l'est de 65°E. De très forts rendements apparaissent en particulier au large de la Somalie (où se produit un upwelling côtier), d'une part, et au nord et a l'est des Seychelles, d'autre part. Ils resultent d'une activité principalement portée sur épaves derivantes (75 %) procurant un fort taux de succès des coups de filets (90 à 95 % de coups non nuls). Le listao se trouve alors fortement représenté dans ces prises (61 %).

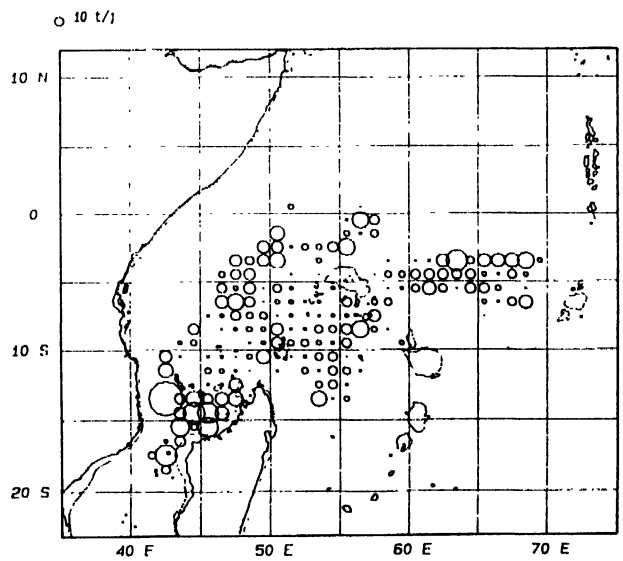
Le quatrieme trimestre rassemble la plus grosse fraction de la production annuelle (34 % du total 1983-1986). Ce trimestre couvre a la fois la fin de la saison de pêche sur epaves, au large de la Somalie (de 0° a 10°N) et le debut de l'activite de pêche sur mattes, dans l'est des Seychelles. Les PUE sont d'ailleurs plus élevées au nord de l'equateur (pêche sur epaves) que dans la zone sud-equatoriale. La predominance des prises sur épaves se traduit par une large majorite de listao constituant 67 % du total capturé. Le rendement de ce trimestre est, en moyenne, le plus eleve de l'annee (15,7 t/j sur les annees 1983-1986).

Un examen plus général des prises par espece fait apparaitre que 55 % des prises d'albacore sont effectuées durant le premier semestre, alors que les prises de listao (61 % du total annuel de cette espèce) predominent durant le second semestre. On constate donc une cer-

taine « specificite saisonniere » des prises, très dépendante du mode d'activité de pêche. Les pêches sur mattes libres principalement réalisees dans l'ouest et dans l'est des Seychelles, de 0° à 10°S, pendant le premier semestre, produisent surtout de l'albacore. A l'inverse, les prises sur epaves, effectuées au large de la Somalie (0° a 10°N) durant le second semestre entrainent une prédominance du listao.



a) trimestre 1



b) trimestre 2

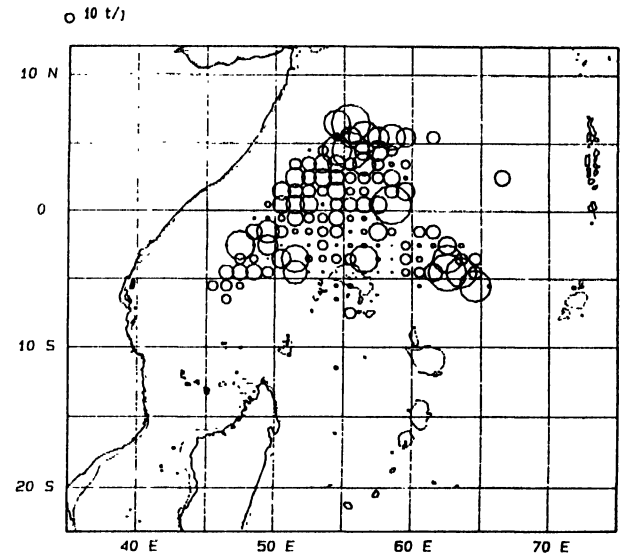
Fig. 2 — Repartition par degre et par trimestre des prises par unite d'effort (en tonnes par jour) des thoniers senneurs industriels dans l'Ocean Indien occidental, de 1983 a 1986.

ronnement aisément mesurables, discerner des aires ou le thon irait préferentiellement se concentrer ? On depasse ainsi un premier stade limité a la disponibilite de la ressource : en effet, les conditions moyennes du milieu en zone tropicale permettent une repartition spatiale très large des especes qui nous concernent. Définir les zones propices aux regroupements introduit

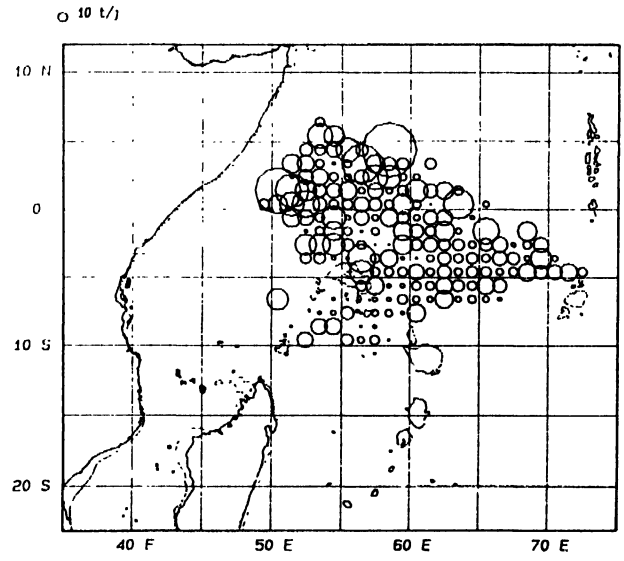
III. — RELATIONS ENTRE RENDEMENTS DE PECHE ET CONDITIONS DE SURFACE

III.1. Définition de la problématique

Au stade actuel des recherches dans l'ocean Indien occidental, la problematique est contenue dans la question suivante : peut-on, a l'aide de parametres de l'envi-



c) trimestre 3



d) trimestre 4

Fig. 2 (suite)

le stade suivant, à savoir celui de la vulnérabilité de la ressource, étant entendu que le thon ne peut être exploite efficacement au moyen de techniques de surface que s'il est concentre.

L'utilisation des éventuelles relations entre le regroupement de bancs de thon et l'environnement pour

conduire une flottille, necessite une bonne connaissance des conditions d'accessibilité à la ressource, ou plus exactement des facteurs limitant l'emploi des engins de pêche. La conduite opérationnelle de flottille recherchera l'intersection des deux grands ensembles vulnérabilité et accessibilité, au fil des saisons, et selon les zones d'intérêt (fig. 3).

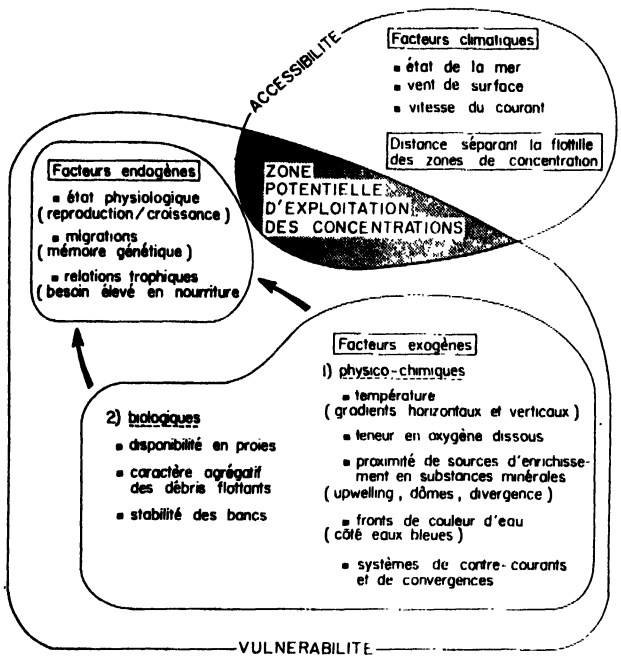


Fig. 3 — Elements intervenus dans la conduite de flottille thoniere.

La réponse à la question initiale passe par une analyse approfondie des degrés de correspondance entre paramètres (ou conjonction de paramètres) hydrologiques et abondance en thon, dans un même volume espace-temps. Cet ouvrage étant dédié aux techniques de télédétection, seuls la température et le vent, facteurs directement mesurables à partir de satellites, seront examinés et les paramètres de subsurface intentionnellement occultes.

III.2. Méthode

a) Préparation des données :

Les données analysees proviennent des observations des senneurs français recueillies entre 1983 et 1986. Selon les périodes, deux zones sont considérées : le canal de Mozambique (8°S-23°S/35°E-50°E) d'avril à juin, et la zone nord-équatoriale (0°-12°N/43°E-60°E) d'août à novembre. Afin de disposer d'un nombre suffisant d'observations, nous avons retenu des strates de 5°/quinzaine.

Les données de pêche ont été triées de manière à séparer l'activité sur épaves dérivantes de l'activité sur épaves dérivantes de l'activité sur mattes libres. Trois fichiers ont ainsi été constitués : l'un rassemblant les résultats des pêches sur épaves, le second les pêches sur mattes et le troisième regroupant les deux premiers. Les paramètres retenus sont les suivants :

- prises (en tonnes),
- rendement par coup de filet, positif ou nul (en tonnes),
- rendement par coup de filet positif (en tonnes); et uniquement pour le fichier global (epaves + mattes) :
- prises par unité d'effort (en tonnes/jour de pêche).

Dans ces mêmes strates, des moyennes de température et de force du vent (en degré Beaufort) ont été calculées. S'agissant des données d'environnement, nous avons préféré considérer celles acquises par les senneurs plutôt que des valeurs moyennes disponibles par d'autres sources pour s'assurer d'une parfaite concordance entre les positions des mesures et celles des pêches.

En outre, des tableaux de contingence ont été calculés indépendamment des strates « 5°/quinzaine », c'est-a-dire en regroupant l'ensemble des informations, dans chacune des deux zones étudiées.

Une première serie de tableaux contient les frequences de classes de rendements par coup de filet et de rendements par coup positif en fonction de la température, d'une part, et de la force du vent, d'autre part. Une seconde serie regroupe les valeurs des rendements par coup de filet et des rendements par coup positif en fonction de la temperature *et* de la force du vent simultanement.

b) Méthode d'analyse :

Les relations environnement-pêche sont generalement etudiées au moyen de correlations (simples ou multiples). Des lors que l'on s'adresse à de grands prédateurs situes a des niveaux trophiques eleves, il peut être interessant de calculer des corrélations croisées qui integrent un dephasage entre un evenement hydrologique et l'éventuel impact sur la production biologique. Nous comparerons ainsi les résultats de correlations directes (quinzaines correspondantes) à ceux de correlations croisees (pêche de la quinzaine Q + 1 en fonction de la température et de la force du vent de la quinzaine Q).

Tableau 4 : Reduction des fichiers par elimination des strates ayant moins de 5 coups de filet. (Ni : nombre initial de strates; Nf : nombre final de strates).

a) selection pour traitement par correlations directes

ZONE	EPAVES		MATTES		GLOBAL	
	Ni	Nf	Ni	Nf	Ni	Nf
Nord-Équatoriale.	36	28	30	17	39	31
Canal Mozambique	24	18	26	22	29	26

b) sélection pour traitement par corrélations croisés

ZONE	EPAVES		MATTES		GLOBAL	
	Ni	Nf	Ni	Nf	Ni	Nf
Nord-Équatoriale....	32	25	28	17	35	27
Canal Mozambique..	20	15	20	18	23	21

Pour chacun de ces traitements, les fichiers de base (cf. paragraphe précédent) sont reexaminés de manière à éliminer les strates comprenant moins de cinq coups de filet, pour ne retenir que des estimations de rendement significatives. Le nombre de strates considérées pour chaque traitement est indiqué dans les tableaux 4 a et 4 b. Le tableau 5 met en évidence la variabilité du nombre d'observations de température et de vent par strate qui traduisent en fait les sejours plus ou moins longs des navires dans ces strates. On constatera, d'après le tableau 6, que la présente étude s'appuie sur un nombre relativement elevé de coups de filet (maximum de 2 007 en zone nord-equatoriale et de 1 310 dans le canal de Mozambique) et sur des niveaux de captures substantiels (maximum de 65 623 tonnes en zone nord-équatoriale et de 17 361 tonnes dans le canal de Mozambique).

TABLEAU 5 : Nombre d'observations de temperature et de vent, par strate de 5°/quinzaine, retenues dans l'analyse, selon le type d'activite et les zones.

a) Selection pour traitement par correlations directes

Zone et	Type d'activite	Temperature surface			Force du vent		
		Nmin	Nmax	Nmoy	Nmin	Nmax	Nmoy
Nord-Equatoriale	Epaves		262	95		257	93
	Mattes		262	134		257	130
	Global		262	87		257	85
Canal Mozambique	Epaves		137	47		156	51
	Mattes		137	39		156	42
	Global		137	36		156	38

b) Sélection pour traitement par corrélations croisées

Zone et	Type d'activité	Temperature surface			Force du vent		
		Nmin	Nmax	Nmoy	Nmin	Nmax	Nmoy
Nord-Equatoriale	Epaves		262	99		257	96
	Mattes		262	122		257	116
	Global		262	96		257	92
Canal Mozambique	Epaves		137	40		156	40
	Mattes		137	41		156	44
	Global		137	39		156	41

III.3. RESULTATS

a) Aperçu général :

Au préalable, les situations hydrologiques des deux zones étudiées doivent être explicitees. Dans la région nord-équatoriale, on assiste, d'août à novembre, à un réchauffement de l'eau superficielle dû a la disparition progressive de l'upwelling somalien en fin de mousson de sud-ouest (atténuation du vent) puis à l'inter-mousson qui précède l'arrivée de la mousson de nord-est. Durant les trois mois d'activité plus ou moins forte de l'upwelling (juin, juillet, août), le secteur a subi un enrichissement de la couche euphotique en substances nutritives minérales. Dans le canal de Mozambique, on observe, d'avril à juillet, un refroidissement sur place en raison d'une faible advection d'eaux sud-équatoriale et subtropicale. Cette chute des températures est liée à l'etablissement de l'hiver austral, avec un renforcement du vent de sud-est. Les sources d'enrichissement en sels nutritifs résultant de l'apparition sporadique de petits upwellings, restent moins marquées que dans la région sous influence de l'upwelling somalien.

L'evolution des pêches est donc examinee dans deux contextes évolutifs distincts, l'un étant un rechauffement post-upwelling, l'autre un refroidissement hivernal classique.

Un premier examen des evolutions respectives de la temperature de surface, de la force du vent, des rendements par coup de filet et des prises par unité d'effort, par quinzaine (fig. 4), fait apparaitre :

- une relation inverse entre la force du vent et la temperature (peu surprenante);
- une certaine hétérogénéité dans l'évolution des paramètres pêche, que l'on tentera d'expliquer plus loin;
- la mise en evidence d'une « fenêtre optimale » des conditions d'environnement, conformément a la définition de Cury et Roy (1988), regroupant les meilleurs resultats de pêche.

On peut assigner aux parametres pêche retenus trois significations :

1) Le rendement par coup de filet peut être perçu comme un estimateur de la disponibilité de la ressource sans prejuger pour autant de sa vulnerabilite vis-a-vis de la senne.

2) Le rendement par coup de filet positif renseigne sur la taille des bancs (au moins, leur fraction capturable). Il integre donc le facteur vulnerabilité.

3) La prise par unite d'effort, uniquement calculée pour la combinaison des activites sur epaves et sur mattes libres, est un estimateur global de la ressource vulnerable, indépendamment de la taille des bancs.

Les courbes de la figure 4 font ressortir des évolutions similaires des deux derniers paramètres, ayant en commun le facteur vulnérabilite, alors que le premier montre une evolution specifique.

Enfin, la « fenêtre environnementale optimale » semble plus dependre des conditions de vent que de la temperature, les premieres pouvant devenir des facteurs limitants de l'activité de pêche. Les meilleures conditions semblent être les vents modérés (force 2 et 3), en particulier ceux faisant suite à des périodes de vent fort (cf. zone nord-equatoriale).

b) Analyse des corrélations environnement-pêche :

La distribution non normale des paramètres et l'utilisation d'une échelle qualitative pour le vent, nous ont

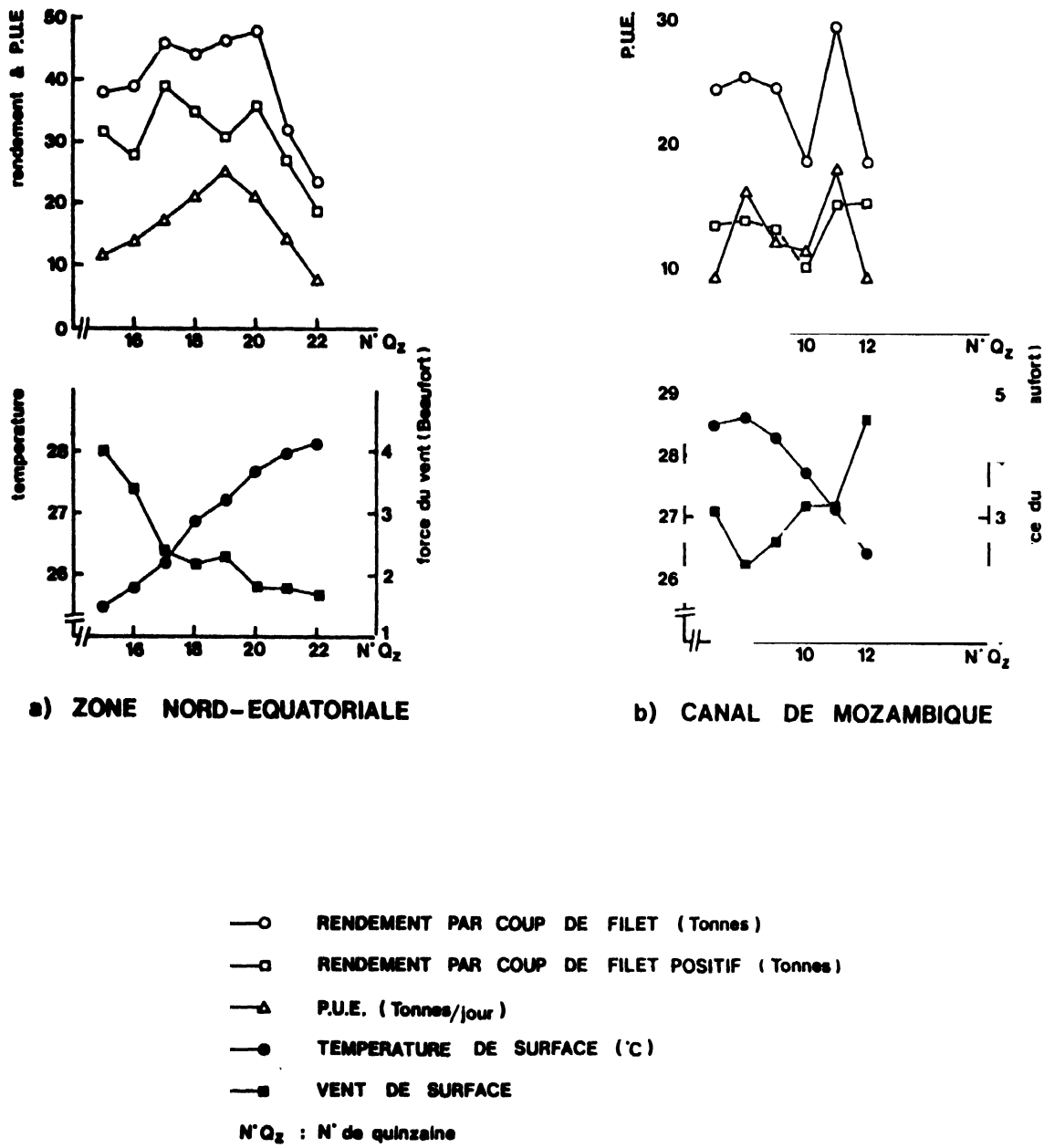


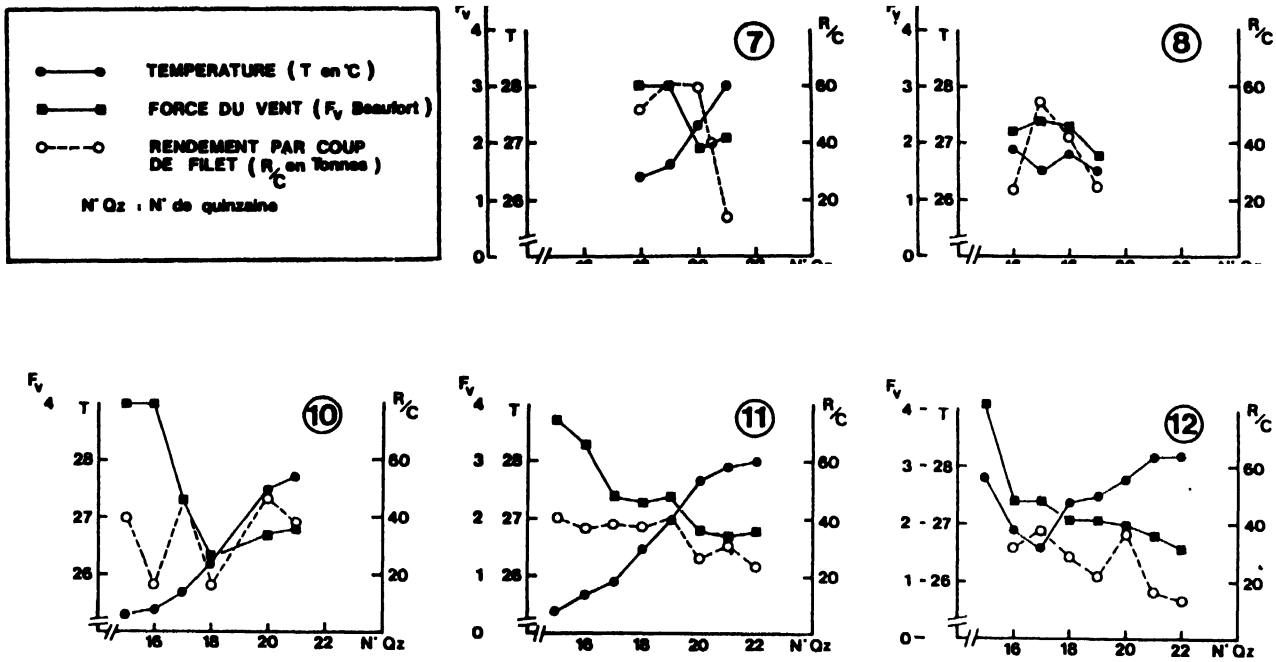
Fig. 4 – Evolution comparee de la temperature de surface (en °C), du vent (force Beaufort), du rendement par coup de filet, du rendement par coup de filet positif et des P.U.E.

conduit à utiliser un coefficient de corrélation de rang (Spearman). Ces methodes non paramétriques sont particulièrement bien adaptées aux données présentant des évolutions monotones (croissantes ou decroissantes), telles que celles décrites dans cette étude.

– Zone nord-équatoriale (fig. 5) :

Les valeurs maximales de rendement par coup de filet sont plus fortes dans les carrés 7 et 8 (60 t) que dans les carrés situés plus au sud (10, 11, 12 : 40 t). La plus grande intensité de l'upwelling dans sa partie nord (8°N à 12°N) expliquerait cette difference de production. Néanmoins, un effet inverse peut se produire au début de la saison d'upwelling, en juin, lorsque des eaux froides apparaissent brutalement en surface, d'une semaine à l'autre, pouvant alors enfermer des populations dans un piège thermique lethal. Foxton (1965) avait d'ailleurs observe a cette période des mortalités massives de poissons pelagiques au large de la Somalie.

La corrélation entre la force du vent et la température est hautement significative dans les deux cas de figures envisages, à savoir à quinzaines correspondantes ($r = -0.644$, $\alpha < 1$ ‰) et a quinzaines décalées ($r = -0.721$, $\alpha < 1$ ‰).



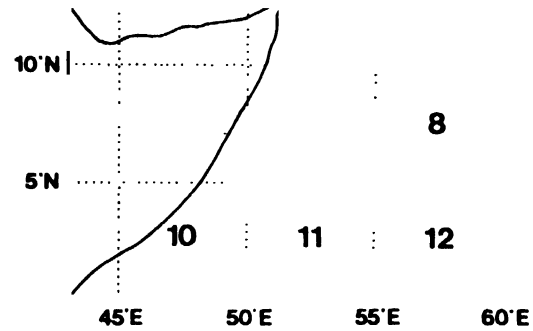


Fig. 5 — Evolution comparee de la temperature de surface (en °C), du vent (force Beaufort) et du rendement par coup de filet (en tonnes) regroupant epaves et mattes libres, par quinzaine et par carre de 5° × 5°, d'aout a novembre dans la zone nord-equatoriale.

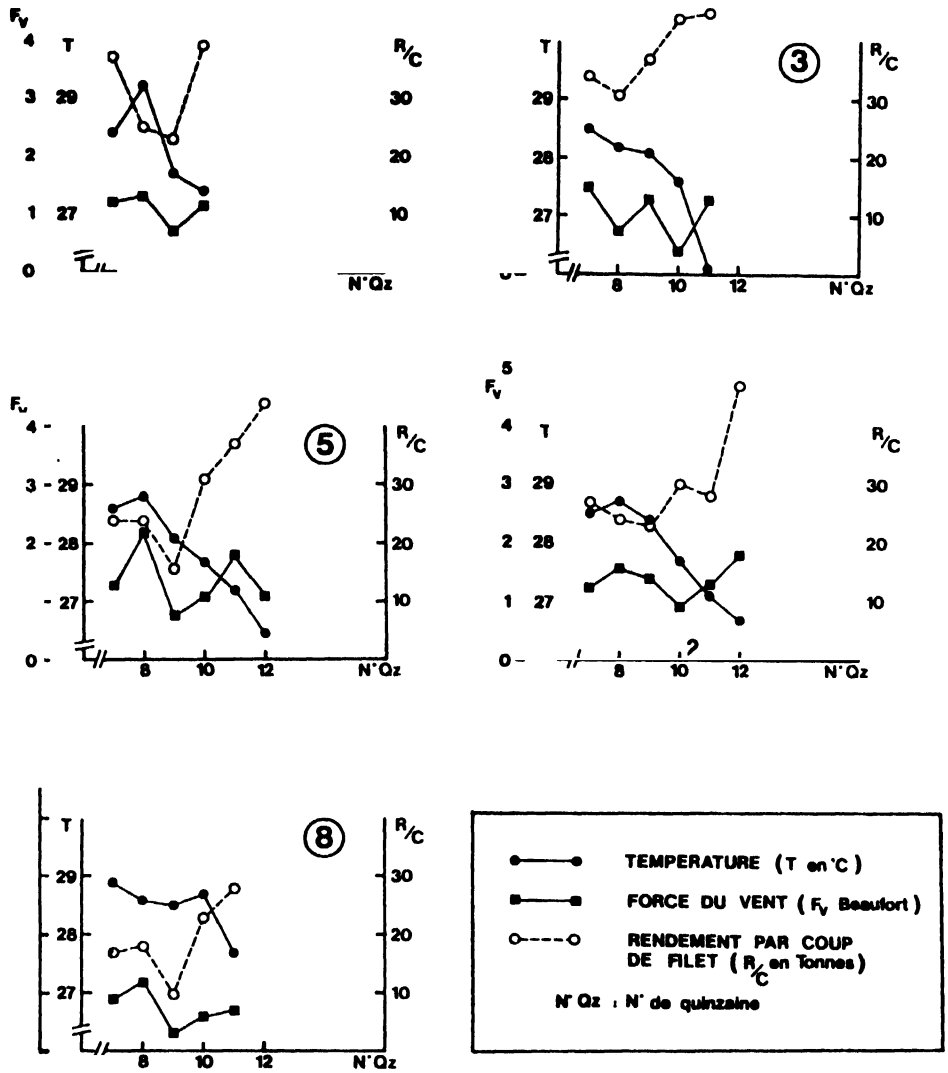
TABLEAU 6 : Resume des statistiques de pêche par zone et par type d'activite

a) Selection pour traitement par correlations directes

Zone et Type d'activite		Captures totales (tonnes)	Nbre coups total	Nbre coups positifs
Nord-Equatoriale	Epaves	59 258	1 384	1 248
	Mattes	5 751	593	259
	Global	65 623	2 007	1 527
Canal Mozambique	Epaves	10 050	437	361
	Mattes	7 075	855	343
	Global	17 361	1 310	718

b) Sélection pour traitement par corrélations croisées

Zone et Type d'activite		Captures totales (tonnes)	Nbre coups total	Nbre coups positifs
Nord-Equatoriale	Epaves	57 844	1 346	1 210
	Mattes	6 279	631	288
	Global	64 632	2 004	1 515
Canal Mozambique	Epaves	9 050	381	320
	Mattes	6 180	771	308
	Global	15 451	1 167	640



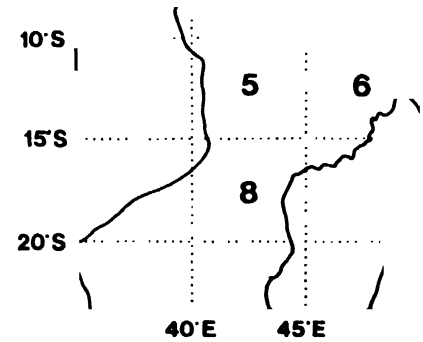


Fig. 6 — Evolution comparée de la température de surface (en °C), du vent (force Beaufort) et du rendement par coup de filet (en tonnes) regroupant épaves et mattes libres, par quinzaine et par carré de 5° × 5°, d'avril à juin dans le canal de Mozambique.

Les corrélations directes entre température, force du vent et pêche (tabl. 7 a) restent non significatives sauf dans le cas du rendement global par coup de filet en fonction de la température.

Les corrélations croisées entre température, force du vent et pêche sur épaves (tabl. 8 a) sont par contre hautement significatives.

— Canal de Mozambique (fig. 6) :

Le vent et la température y sont fortement corrélés ($r = -0.69$, $\alpha < 1$ ‰ à quinzaines correspondantes; $r = -0.490$, $\alpha < 2.5$ % à quinzaines décalées). Les rendements de pêche fluctuent beaucoup, les valeurs maximales étant du même ordre de grandeur dans le nord du Canal (15 à 20 t) et plus faibles au centre (carré 8, 10 à 12 t).

Les corrélations directes (tabl. 7 b) ne sont significatives qu'entre le rendement par coup de filet et le vent.

Il faut cependant noter que la corrélation, négative avec les épaves, devient positive dans le cas des mattes libres.

Les valeurs remarquables des corrélations croisées ne concernent que les mattes libres : les rendements par

TABLEAU 7 : Tableau de correlation entre parametres d'environnement et resultats des pêches, selon le type d'activite. Traitement par quinzaines correspondantes (corr. directes). Coefficient de correlation de Spearman.

a) Zone nord-equatoriale

		Prises	Rendt 1	Rendt 2	P.U.E
Epaves	Tempe	0.044	- 0.281	- 0 228	
(n = 28)	Vent	- 0.025	0 247	0.178	
Mattes	Tempe.	- 0.136	- 0.177	- 0 210	
(n = 17)	Vent	- 0 067	0 038	0.326	
Global	Tempe.	0.078	- 0 419**	- 0 275	- 0 122
(n = 31)	Vent	- 0 033	0 290	0 199	0.086

b) Canal de Mozambique

		Prises	Rendt 1	Rendt 2	P.U.E
Epaves	Tempe	- 0 002	0 122	0.143	
(n = 28)	Vent	- 0 284	- 0.399*	- 0 367	
Mattes	Tempe	- 0.077	- 0.314	0.056	
(n = 17)	Vent.	0.245	0.618***	0 262	
Global	Tempe.	- 0.012	- 0 040	0 138	0.216
(n = 26)	Vent	0.078	0.332*	- 0.140	- 0 297

Seuils de signification
* 5 %
** 2,5 %
*** < 1 %

Rendt 1 rendement (en tonnes) par coup de filet.
Rendt 2 rendement (en tonnes) par coup de filet positif

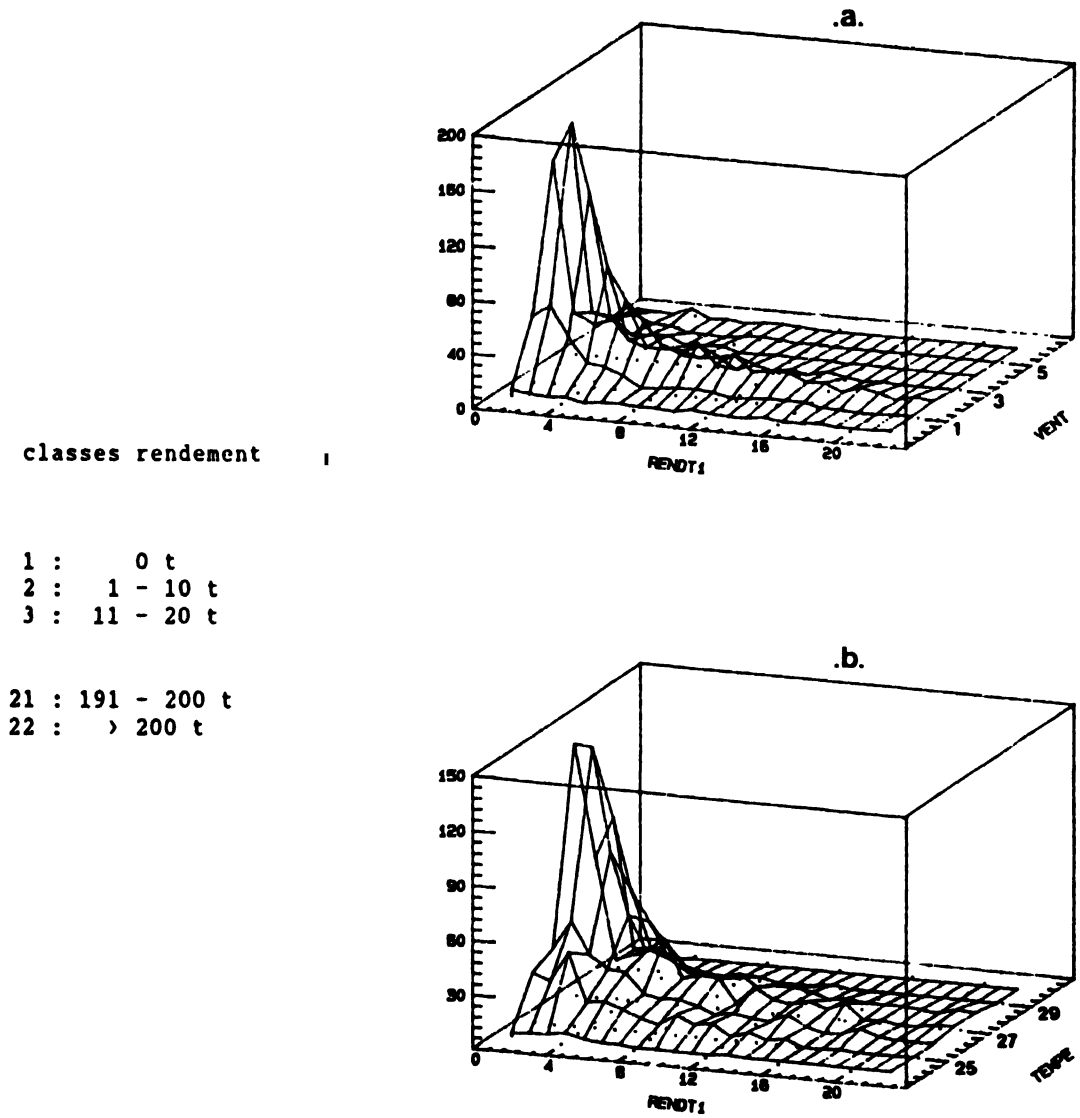
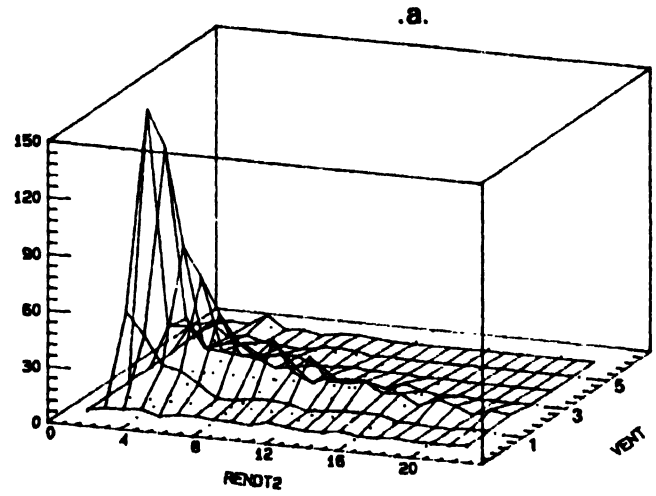


Fig. 7 — Distribution des niveaux de rendements par coup de filet (classes de 10 t) en fonction du vent (a) et de la temperature de surface (b) dans la zone nord-equatoriale (août a novembre, 1983-1986).

classes rendement

1 : inexistante
2 : 1 - 10 t
3 : 11 - 20 t

21 : 191 - 200 t
22 : > 200 t



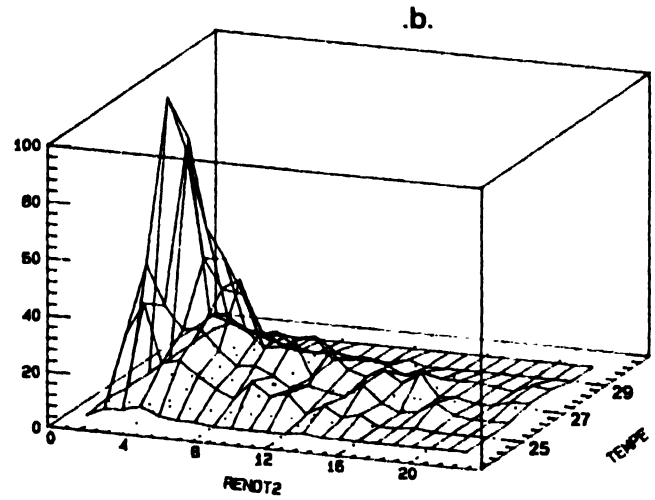


Fig. 8 — Distribution des niveaux de rendements par coup de filet positif (classes de 10 t) en fonction du vent (a) et de la temperature de surface (b) dans la zone nord-equatoriale (août a novembre, 1983-1986).

coup de filet sont hautement significatifs (α = 1 ‰) en fonction de la temperature et de la force du vent, alors que les rendements par coup positif ne sont corrèles qu'au vent.

c) Analyse des tableaux de contingence :

La premiere série de tableaux est traduite sous forme de diagrammes a trois dimensions. La topographie de la surface correspond a la fréquence de chaque couple rendement-température et rendement-vent. Les rendements par coup de filet ont éte rangés en classes de 10 t, la température en classes de 1°C et la force du vent est exprimée en degré Beaufort.

— Zone nord-équatoriale (fig. 7 et 8) :

Les deux types de rendements (par coup : RENDT 1, et par coup positif : RENDT 2) forment une crête marquée le long des forces de vent comprises entre 2 et 3 Beaufort. En fonction de la température, on obtient deux crêtes, l'une à 25°C, l'autre à 27°C. Ceci confirme une plus forte dépendance des rendements par rapport au vent que par rapport a la temperature, constatation deja faite au paragraphe III.3.a. On s'aperçoit egalement que la fenêtre environnementale optimale reste la même, quel que soit le niveau de rendement.

— Canal de Mozambique (fig. 9 et 10) :

Les relations rendement-milieu sont legèrement differentes dans cette region. En effet, pour des rendements inférieurs a 30 tonnes, on constate deux creneaux favorisant la pêche, mieux differencies dans la relation avec la force du vent (modes a 2 et à 5 Beaufort) que dans la relation avec la température (modes a 28°C et à 30°C). Lorsque la thermocline est marquée, ce qui est le cas dans le Canal à cette saison (Piton *et al.*, 1981), un vent fort va provoquer une diminution du gradient de densité, favorisant la diffusion verticale de substances nutritives vers la surface. Il est probable que les bonnes pêches associées au vent fort résultent d'un tel proces-

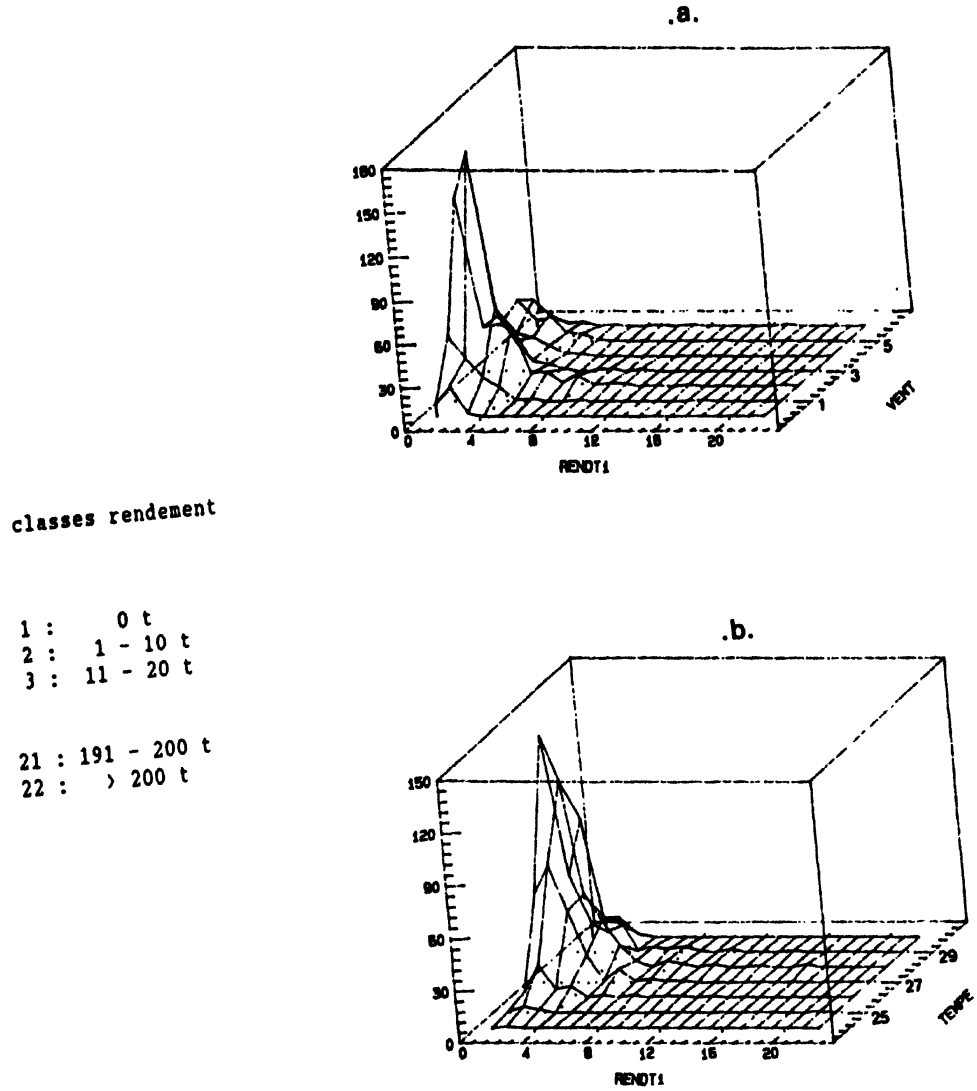


Fig. 9 – Distribution des niveaux de rendements par coup de filet (classes de 10 t) en fonction du vent (a) et de la temperature de surface (b) dans le canal de Mozambique (avril à juin, 1983-1986)

sus. C'est toute la difference entre cette zone où l'enrichissement des couches de surface nécessite des coups de vents ponctuels et la région nord-équatoriale, ayant été sous influence d'upwelling pendant plusieurs mois, qui reste productive pendant quelques semaines, en phase post-upwelling.

La deuxième série de tableaux traduites sous forme de diagramme simple, fixe un peu mieux les valeurs limites, en température et en force de vent, de la fenêtre environnementale optimale.

– Zone nord-équatoriale (fig. 11a) :

La fenêtre dans laquelle se trouve concentre le maximum de la ressource (rendement par coup > 40 t) se rétrécit progressivement, au fur et à mesure que l'on avance dans la saison de pêche et que l'on quitte la phase post-upwelling. L'intensité du regroupement en larges bancs (rendements par coup positif > 50 t) est particulièrement marquee entre 26° et 27°C, pour des vents compris entre 3 et 10 nœuds (force 1 à 3).

– Canal de Mozambique (fig. 11 b) :

La fenêtre environnementale presente une forme particulière. La disponibilité maximale (rendement > 10 t) ne suit pas une évolution constante pendant la saison de pêche. Néanmoins, là encore, les eaux les moins chaudes (26° à 27°C) semblent favorables au rassemblement des thons. La zone des plus fortes tailles de bancs (rendement par coup positif > 20 t) sort du champ de la fenêtre « disponibilité », au niveau des faibles valeurs de vent, où l'on trouvera des conditions plus propices à une pêche efficace. Le créneau où les deux zones ne se chevauchent pas (28°C > T > 29°C, 1 > vent > 10 nœuds) correspondant vraisemblablement à des secteurs où les bancs sont peu nombreux mais de taille relativement importante.

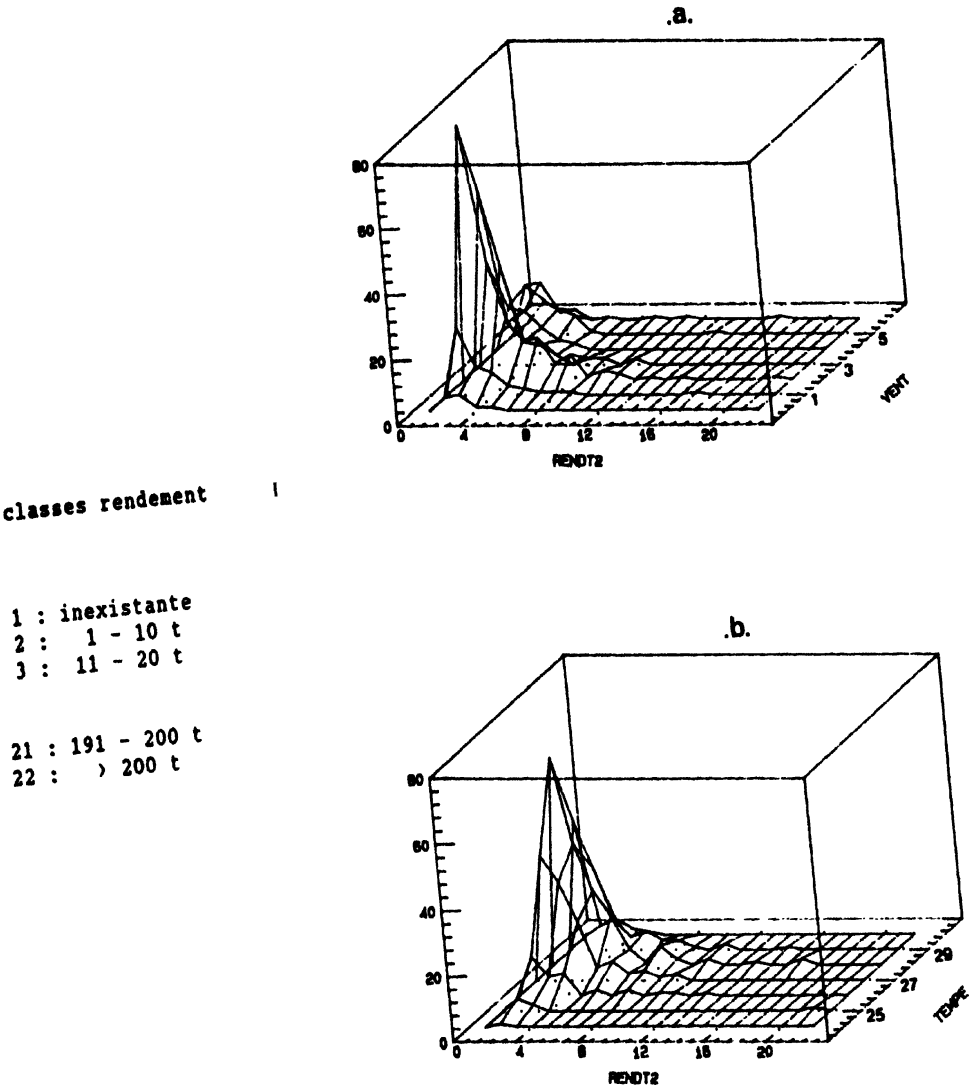


Fig. 10 – Distribution des niveaux de rendements par coup de filet positif

III.4 CONCLUSIONS

Cette analyse confirme l'existence d'un déphasage entre évolution des conditions de surface et production thonière. On constate en effet des corrélations significatives entre situation hydrologique (température et vent) d'une quinzaine donnée et rendements de pêche de la quinzaine suivante, quelle que soit la zone considérée. Dans la zone nord-équatoriale, disponibilité en thon et taille des bancs diminuent lorsque la température augmente et que le vent faiblit. Ceci traduit probablement l'appauvrissement progressif en proies au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la saison d'upwelling. Les observations se rapportent aux bancs liés aux épaves dérivantes, prédominants dans cette zone. Dans le canal de Mozambique, seule l'activité de pêche sur mattes libres montre des corrélations hautement significatives. Les coups de vent qui tendent à briser la structure thermique verticale, refroidissent la surface tout en faisant remonter des matières nutritives dans la couche euphotique. Ils ont pour effet, au sein de la quinzaine durant laquelle s'est produit cet événement, mais surtout dans la quinzaine suivante, d'accroître la disponibilité du poisson et de favoriser le regroupement en bancs de grande taille. Le fait qu'aucune corrélation significative n'ait été obtenue avec les PUE peut s'expliquer de diverses façons :

- La combinaison des activites sur epaves et mattes ne produit pas un estimateur fiable de la ressource dans des zones ou s'appliquent des stratégies de pêche fort différentes (épaves et mattes); il s'avère indispensable de calculer des PUE relatives à chaque type de pêche, moyennant un algorithme qui reste à définir.

- Il est egalement fort probable que la seule prise en compte de la température et du vent de surface soit très insuffisante pour expliquer le niveau d'abondance d'une ressource occupant un large volume compris entre 0 et 200-300 m de profondeur. L'inté-

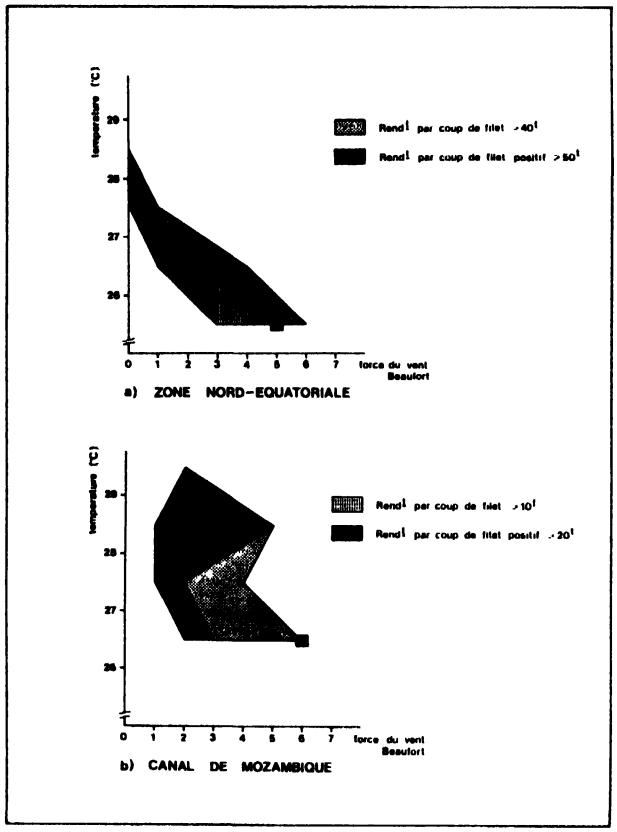


Fig. 11 — Fenetres environnementales optimales des rendements par coup de filet (disponibilite de la ressource) et des rendements par coup positif (fraction vulnerable a la senne).

gration des structures subsuperficielles en particulier immersion et gradient thermique de la thermodine devient alors nécessaire.

Un elément commun aux observations faites dans chaque zone est la concentration de la ressource dans les eaux les moins chaudes (25° a 26°C dans la zone nord-équatoriale, 26° a 27°C dans le canal de Mozambique). En outre, des vents trop forts (vitesse > 20 nœuds) nuisent a la vulnerabilite des bancs. Un compromis reste donc à trouver. Au nord de l'equateur, il peut être intéressant de surveiller l'évolution du vent à partir du mois d'août pour être prêt a pêcher dès qu'il diminue en-dessous d'un certain seuil (17 à 20 nœuds). Ensuite, lorsque les eaux depassent 28°C, la saison de pêche touche à sa fin dans cette zone. Dans le canal de Mozambique, l'evolution est moins typique. Il faudra de preférence rechercher les secteurs ayant ete soumis pendant les deux ou trois semaines precedentes à des coups de vent ponctuels.

Il ressort de ceci la necessite de disposer rapidement (à l'échelle de la semaine) d'un minimum de données de température et de vent. L'analyse des champs thermiques de surface à partir de satellites défilants, dans l'océan Indien occidental, a été conduite à partir d'une méthode mise au point par Gohin (1987) faisant appel à la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965). Fondée sur une analyse de la structure du champ des valeurs de temperature, elle permet de calculer une valeur du paramètre et l'erreur associée aux nœuds d'un réseau maillé à partir d'observations inégalement réparties dans l'espace. Cette méthode d'estimation est connue sous le nom de « krigeage ». C'est ainsi qu'une cartographie de l'upwelling somalien a pu être réalisée à partir de données GAC (Global Area Coverage) délivrees par le satellite NOAA-9, auxquelles ont été incorporées des donnees de temperature mesurées par des bateaux marchands (Gohin et Marsac, 1988). La carte du 8 au 15 juin 1985 (fig. 12) fait nettement apparaitre deux pôles de refroidissement le long de la côte somalienne, sur 4°N et 10°N. Ils s'étendent en cône vers le large sous l'effort du courant qui forme deux cellules anticycloniques développant des convergences en leur centre. De telles images produites en séquence à partir d'une station de réception regionale aideraient à localiser des zones cibles dont les conditions correspondraient à celles qui viennent d'être décrites. En complément, des expériences encourageantes de thermographies du canal de Mozambique a partir de Meteosat sont en cours et pourraient être mises à profit.

Il est possible de réunir en une seule image de synthèse, couvrant une période de plusieurs jours, des données d'origines diverses (Meteosat, NOAA-Tiros, navires) afin de produire une thermographie réaliste dont la précision peut être evaluée grâce à l'approche geostatistique. Il faut cependant savoir que la region occidentale de l'ocean Indien ne présente des contrastes thermiques en surface que de juin à octobre, ce qui limite à une période de six mois l'utilisation des thermographies satellitaires pour la conduite de flottille.

TABLEAU 8 : Tableau de correlation entre paramètres d'environnement et resultats des peches, selon le type d'activite. Traitement par quinzaines decalees (corr. croisees). Coefficient de correlation de Spearman.

a) Zone nord-equatoriale

		Prises	Rendt 1	Rendt 2	P.U.E
Epaves (n = 25)	Tempe.	- 0.391**	- 0.479***	- 0.423**	—
	Vent	0 294	0 582***	0.543***	—
Mattes (n = 17)	Tempe.	- 0.026	- 0.020	- 0.114	—
	Vent.	- 0.062	- 0.044	0.169	—
Global (n = 27)	Tempe	- 0.164	- 0.462**	- 0.399**	- 0.222
	Vent.	0 194	0.517***	0.539***	0.313

b) Canal de Mozambique

		Prises	Rendt 1	Rendt 2	P.U.E
Epaves (n = 15)	Tempe.	0.172	0.378	0.433	—
	Vent.	- 0.027	- 0.127	- 0.172	—
Mattes (n = 18)	Tempe.	- 0.333	- 0.754***	- 0.283	—
	Vent.	- 0.045	0.619***	0.467**	—
Global (n = 21)	Tempe.	- 0.087	- 0.372*	0.171	0.022
	Vent.	- 0.229	0.203	- 0.126	- 0.328

Seuils de signification :
*: 5 %
**. 2,5 %
***: < 1 %

Rendt 1 : rendement (en tonnes) par coup de filet;
Rendt 2 : rendement (en tonnes) par coup de filet positif.

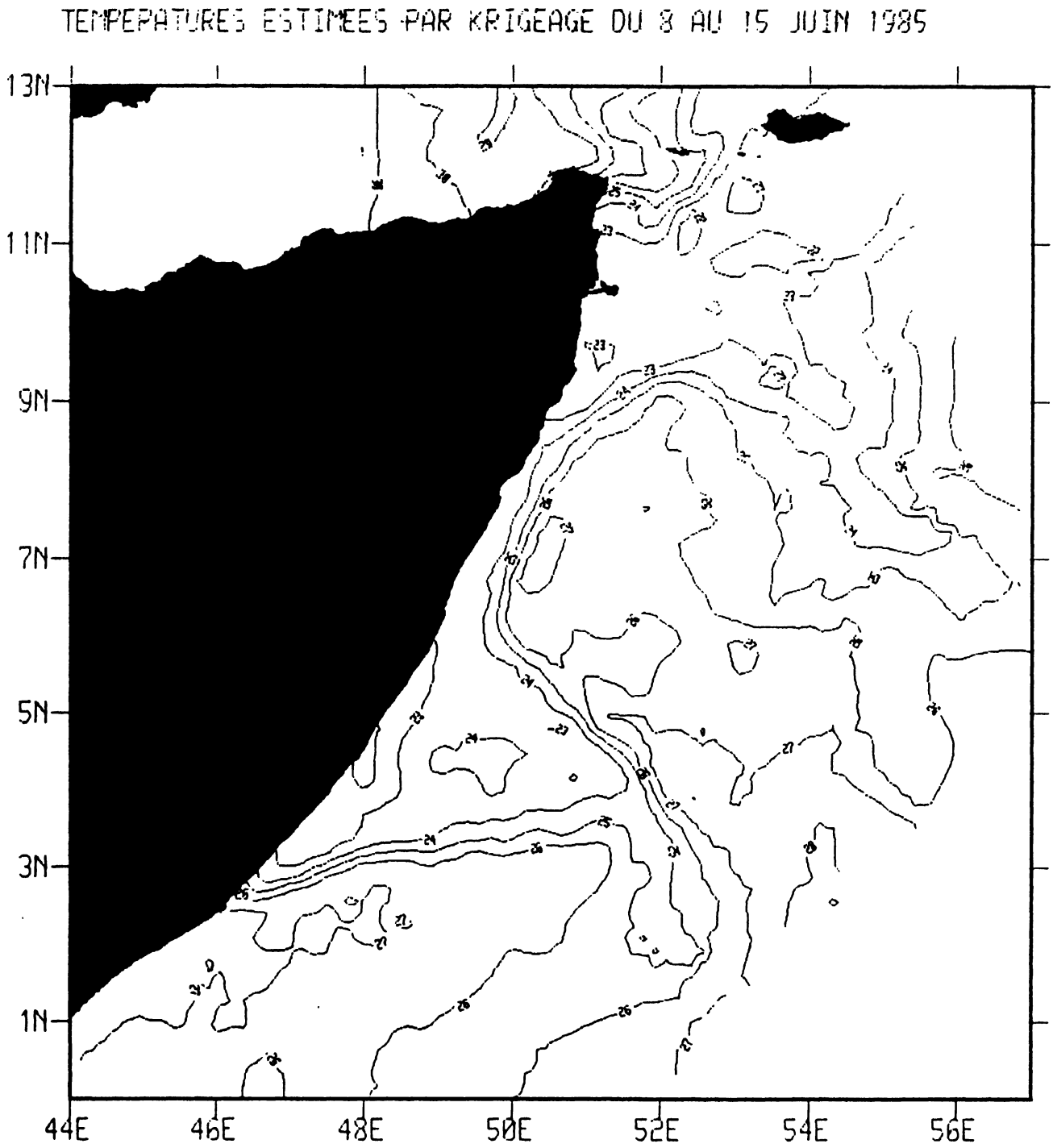


Fig. 12 — Carte de température de surface mettant en évidence l'upwelling de Somalie, du 8 au 15 juin 1985, réalisée par superposition de données satellitaires (AVHRR sous format GAC, NOAA-9) et de données in situ.

IV. VERS UNE AIDE A LA PECHE OPERATIONNELLE DANS L'OCEAN INDIEN

Nous venons de voir que certaines conjonctions de vent et de température peuvent définir sommairement un environnement propice au regroupement des bancs de thons. Il semble toutefois que les relations varient d'une zone à l'autre, en fonction de leur spécificité hydrologique (la présence d'un upwelling, en particulier, en est une).

Néanmoins, il est évident que beaucoup d'autres facteurs doivent être considérés. A partir de profils thermiques de subsurface, on peut extraire plusieurs paramètres (épaisseur de la couche homogène, gradient thermique dans la thermocline, immersion de certains isothermes) qui peuvent être des variables explicatives de la vulnérabilité du thon. Les courants ont aussi leur importance pour la pêche thonière dans la mesure où ils transportent des débris flottants concentrant les pélagiques, qui s'accumulent dans des zones tourbillonnaires

(cas dans la zone nord-équatoriale) ou au niveau de convergences (à la bordure nord du contre-courant équatorial sud).

L'étude combinée de tous ces facteurs, au moyen d'analyses multivariées, permet d'extraire les degrés de correspondance entre plusieurs variables explicatives et les paramètres pêche, et conduira à l'élaboration de modèles d'aide à la pêche régionalisés. Construits sur une base empirique, ils pourront être testés sur les captures déjà faites. L'étape suivante est la phase opérationnelle qui requiert alors des moyens d'acquisition de données du milieu en temps réel. Les clés du système sont, d'une part, une réalisation aisée des mesures et, d'autre part, leur transmission rapide au centre de traitement. D'où l'effort à porter sur l'exploitation des données issues des satellites d'environnement et en particulier, ceux qualifiés d'océanographiques (les descendants de SEASAT : GEOSAT, NROSS, TOPEX). Outre la température de surface délivrée par les radiomètres infra-rouges, et déjà largement utilisée, il faut désormais compter avec les capteurs actifs (radars, altimètres, scatteromètres) qui décrivent les champs de vent, la hauteur des vagues, le déplacement des masses d'eau. Le problème qui subsiste encore, en 1988, est un accès aisé et rapide à ces données, en dehors des États-Unis.

On ne peut négliger le segment mer, déjà bien organisé, à partir des bouées dérivantes et des navires marchands. Dans l'océan Indien, des largages de bouées munies de chaînes de thermistance sont en cours dans le cadre du programme international TOGA. Des lignes de navires marchands équipés de bathythermographes à tête perdue (XBT) se mettent en place. On assiste actuellement à la mise en service des interfaces couplées à ces XBT et transmettant les données via le système ARGOS. Dans l'immédiat, on peut déjà disposer, au travers du réseau Transpac (ou Dompac) de bathymessages, profils réduits à une vingtaine de points significatifs transmis par radio après les lancers. Enfin, les « message-ships », comprenant les informations sur les conditions de surface (température, vent, dérive), transmises sur le système mondial de télécommmunications, sont directement accessibles par les réseaux déjà mentionnés.

Un dernier point s'adresse aux systèmes de transmission d'informations du centre vers les flottilles, et inversement. La voie offerte par le système Telemer, utilisant le satellite de communication Inmarsat, s'avère très prometteuse. Elle permet la transmission de « pages » qui peuvent s'afficher sur l'écran, d'un micro-ordinateur, à bord du navire, et s'enregistrer sur un périphérique de stockage. Ces « pages » peuvent comporter des messages écrits (suggestions sur les zones à prospecter) ou des cartes à partir desquelles les patrons de navires peuvent bâtir leur propre stratégie de recherche. Un autre intérêt est le caractère « crypté » des transmissions dont ne bénéficieront que les navires autorisés.

On peut résumer comme suit la démarche logique qui devra conduire à une tentative de conduite opérationnelle de flottille dans l'océan Indien, à l'horizon 1990-1992 :

- Analyse des relations thon-environnement dans l'océan Indien, à partir des données récoltées depuis 1982 par les senneurs. Le contexte hydrologique moyen et la mise en évidence de fluctuations interannuelles s'appuient sur les atlas océanographiques et sur une base de données physico-chimiques remontant à 1906.
- Élaboration de modèles régionalisés calculant les probabilités de pêche en fonction des conditions du milieu. Ces modèles empiriques sont testés sur les pêches déjà effectuées de manière à évaluer leur robustesse et déceler les sources d'incertitudes.
- Premières tentatives de mise en application opérationnelle dans l'océan Indien occidental. Il sera nécessaire d'intégrer le plus rapidement possible les résultats des pêches en cours pour améliorer le caractère prédictif de ces modèles.

Ces conclusions, qui peuvent paraître optimistes, doivent cependant être interprétées avec mesure, car les expériences passées ont montré qu'il est difficile de descendre en-dessous d'un certain seuil de précision dans la définition des aires potentielles de pêche. Ponctuellement, des prévisions se sont même avérées totalement fausses, des navires ayant sillonné en vain des secteurs désignés comme favorables. Il faut donc connaître la limite des espérances que l'on peut mettre dans de tels projets.

BIBLIOGRAPHIE

CURY P. et C. ROY, 1988 — Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. Soumis à Can. J. Aqu. Sci.

FOXTON P., 1965 — A mass fish mortality on the Somali Coast. Deep Sea Res. (12) : 17-19.

GOHIN F., 1987 — Analyse géostatique des champs thermiques de surface de la mer. Thèse de Docteur-Ingénieur, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

GOHIN F. et F. MARSAC, 1988 — Estimation de la température de surface de la mer à partir des données satellites AVHRR sous format GAC. Application à l'océan Indien occidental. En préparation.

MATHERON, 1965 — Les variables régionalisées et leur estimation. Masson et Cie, Paris : 305 p.

PITON B., J.H. POINTEAU et J.S. NGOUMBI, 1981 — Atlas hydrologique du canal de Mozambique (océan Indien). Trav. Doc. ORSTOM, Paris (132) : 41 p.

5.5 Contribution de la télédétection aérospatiale à l'étude des thonidés du Pacifique occidental

par
Michel PETIT[1],
Jean-Michel STRETTA[1],
Cécile DUPOUY[2]

SOMMAIRE

Intérêt et potentiel de la télédétection dans le Pacifique occidental pour les études thonières :

1.1. Rappels succincts
1.2. Analyse de la problématique
1.3. Limites et atouts des études de téledetection dans le Pacifique occidental

2. Bilan des recherches en halieutique-télédétection dans le Pacifique sud lors des dix dernières années :

2.1. Le programme de ratiometrie aerienne et prospection thoniere :
2.1.1. Méthodologie et bilan des operations
2.1.2. Résultats directs
2.1.3. Utilisation des donnees RAPT comme vérite-terrain des données satellitaires

2.2. Autres programmes
2.2.1. Le programme Germon du Pacifique sud
2.2.2. Emploi de la téledétection pour les unités de pêche japonaises
2.2.3. Les stations AVHRR australiennes

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Nous avons vu dans ce même ouvrage (chapitre II section 2.3) que le Pacifique tropical sud ouest recele l'un des plus importants stocks de thonidés de la planète pour lequel l'accroissement rapide et brutale de l'exploitation n'est pas exempt de problèmes. Nous essaierons d'analyser ici dans quelle mesure la télédétection aérospatiale peut être un des moyens de contrôle de la situation halieutique thonière dans cette region.

1 Oceanographes du Centre ORSTOM de Montpellier
BP 5045
34032 Montpellier Cedex
France

2 Oceanographes a l'Antenne ORSTOM au COB
IFREMER BP 337
29273 Brest Cedex
France

1. INTERET ET POTENTIEL DE LA TELEDETECTION DANS LE PACIFIQUE OCCIDENTAL POUR LES ETUDES THONIERES

1.1. Rappels succincts

Precédemment (chapitre II section 2.3), nous avons mis en évidence les faits suivants :

a) Plus de 450 000 tonnes de thons tropicaux sont captures chaque annee dans le Pacifique occidental (fig. 1) dont 80 % en surface (70 % par les senneurs — 10 % par les canneurs). Les principales flottilles, americaines et japonaises, ont augmenté leurs prises et leurs efforts de pêche à la senne de façon fulgurante ces dernieres annees. Par exemple, de 1980 a 1984, le nombre de senneurs americains dans la zone a ete quintuplé et les prises ont quasiment double chaque année.

b) La région couverte par ces pecheries est immense : 10°N a 10°S et 130°E à 170°W. Bien qu'essentiellement concentrees au nord de notre zone d'etude, ces pêcheries, de par leur presence et leur importance, ne peuvent pas ne pas avoir une influence sur le reste de la zone.

c) L'etat des stocks des differentes espèces — thons jaunes (*Thunnus albacares*) notamment — ne bénéficie pas d'une connaissance suffisante en regard de l'augmentation rapide de l'exploitation de ces dernieres annees.

d) Les problèmes, actuels ou a venir, de geopolitique locale lies aux ZEE[3], font que l'on doit ou l'on devra prospecter de nouvelles zones.

e) Les données d'environnement acquises par les études classiques d'oceanographie et de biologie des pêches sont, en fait, recentes et ne suffisent pas pour expliquer la relation thon-environnement et sa variabilite dans cette partie du monde.

1.2. Analyse de la problématique

a) L'immensite de la zone occupee par les pêcheries est souvent redhibitoire pour toute étude classique d'oceanographie ou de biologie des pêches. Les changements très rapides que nous avons observés dans le paysage halieutique de la région rendent trop souvent ces études inadaptées ou amoindrissent leur intérêt. Par

3 ZEE Zone economique exclusive

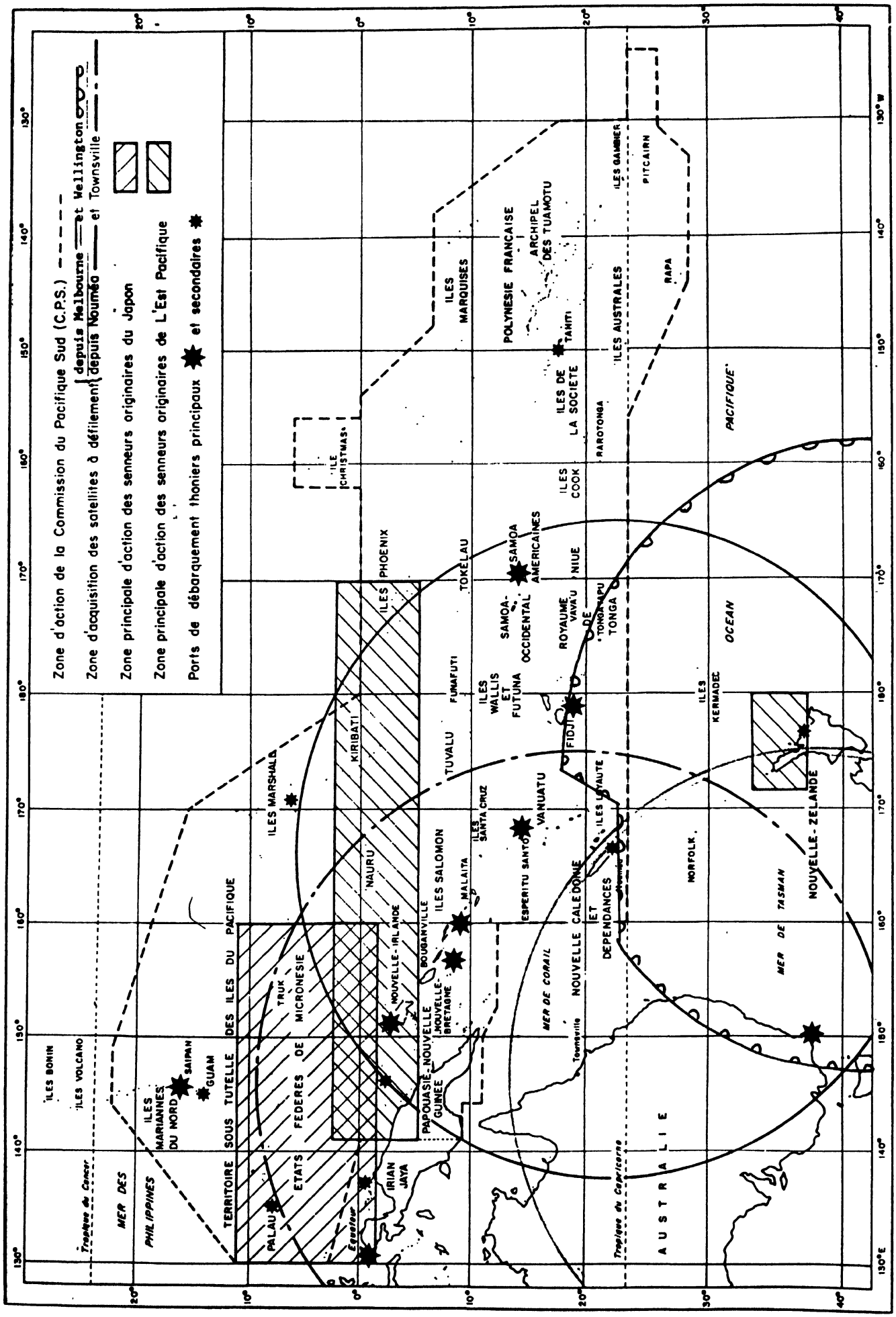


Fig. 1. Carte du Pacifique Sud-Ouest, Pêche thoniere et teledétection

exemple, l'important programme de marquage realise par la CPS[4] à partir de la fin des années 70, a demande, de par sa methodologie propre, plusieurs années avant de pouvoir tirer des conclusions sur l'ensemble de la zone (Kearney, 1980 et 1987). Ce programme, dont l'importance et l'interêt ne sauraient être remis en cause, ne serait-ce que par son innovation régionale, a cependant eu quelques difficultes a repondre aux préoccupations socio-économiques des pays de la région qui assistaient à tous ces changements. D'une façon plus générale d'ailleurs, les bouleversements constates dans la répartition mondiale des pêcheries — mouvement des flottilles FIS[5] et espagnole de l'ocean Atlantique vers l'océan Indien, mouvement de la flottille thoniere du Pacifique est vers le Pacifique ouest, restructuration technologique de la flottille japonaise — devraient amener une réflexion profonde pour essayer d'élaborer une veritable halieutique operationnelle; mais ceci sort du cadre de cet article.

b) Le contexte specifique du Pacifique occidental étant ainsi établi, l'objectif des études thonieres reste le même a savoir comprendre la dynamique des bancs de thons par l'evaluation de leur nombre, de leur concentration et de leur deplacement. Comme il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'observer directement ces phenomenes, les études s'orientent vers le determinisme des mecanismes physico-chimiques qui les régissent. La plupart du temps, les modeles employes (Maugham, 1972; Petit, 1976; Stretta et Slepoukha, 1983; Mendhelson et Roy 1986) se ramènent à l'etude des cellules ou volumes optimaux dans lesquels les bancs de thons se repartissent et y trouvent des conditions euphoriques (Postel, 1969). Les migrations se ramenent alors a un deplacement de ces cellules, deplacement qui peut être dû a :

— un deplacement « physique » du volume d'eau dans les trois dimensions;

— et/ou un deplacement continu des conditions optimales dans le temps;

— et/ou un deplacement continu des conditions optimales dans l'espace.

1.3. Limites et atouts de la télédétection

Bien entendu la teledetection aerospatiale n'est pas et ne peut pas être la panacee universelle qui devrait resoudre tous les problemes. De par sa methodologie propre, la telédetection ne permet pas d'avoir des donnees directement utilisables. C'est la que la notion de modèle prend toute sa valeur, modele ou sont analysées simultanement les donnees principales et secondaires recueillies en temps réel et les données historiques. Cette intégration se fait, de façon opérationnelle en metéorologie, et doit desormais prevaloir en halieutique. Il s'agit donc seulement de contribuer à l'etude de l'environnement des thonidés par la surveillance des paramètres metéorologiques et oceanographiques (PMO) à moyenne échelle et en temps quasi reel (3 à 5 jours).

La bonne adéquation des echelles spatiales entre la zone d'etude et les moyens actuels de la teledetection d'une part, le potentiel d'évolution de cette technique dans la region et son adaptation aux problemes posés d'autre part, constituent les principaux atouts de la télédétection dans l'halieutique du Pacifique sud.

2. BILAN DES RECHERCHES EN HALIEUTIQUE-TELEDETECTION DANS LE PACIFIQUE SUD LORS DES DIX DERNIERES ANNEES

2.1. Le programme de radiométrie aérienne et prospection thonière (RAPT) :

2.1.1. Méthodologie et bilan des opérations

Entre 1979 et 1984, l'ORSTOM a développe un important programme de télédétection aéroportee sur l'ensemble des territoires français du Pacifique sud ainsi qu'au Vanuatu et en Nouvelle Zelande.

TABLEAU 1 : Le programme de Radiometrie Aerienne et Prospection Thoniere.
Bilan chiffre des opérations.

Annee	Region	Heures de vol realisees (heures)	Superficie couverte 10^3 milles^2	Avions utilises
79-82	Nouvelle Caledonie Vanuatu	1 450	1 000	Britten Norman BNIIA
79-80	Wallis et Futuna	100	70	Britten Norman BNIIA
80	Polynesie française	550	380	BNIIA et Aerocommander Shrike
83	Nouvelle Zelande	250	180	Aerocommander Shrike et CESSNA
	TOTAL	2 350	1 630	

Altitude entre 300 et 1 000 pieds vitesse de 115 nds a 130 nds.
Budget total : pres de 4.5 MFF.

TABLEAU 2 : Evaluation du potentiel thonier a partir des opérations de Radiometrie Aerienne et Prospection Thoniere dans la region Nouvelle-Caledonie/Vanuatu.

Zone d'etude	Nouvelle Caledonie 14°30-26°00S// 158°00-175°00E	Vanuatu 12°50-22°00S// 165°00-174°00E
Surface prospectee dans l'aide d'etude (1)	222 309 milles^2	121 431 milles^2
Surface de la ZEE (2) (lettre d'information n° 14 de la CPS)	1 540 000 km^2	670 000 km^2
Intersection de (1) et (2)	env. 200 000 milles^2	env. 100 000 milles^2
Tonnage estime dans l'aire d'etude (tonnes)	88 848 tonnes (51 988-126 055)	47 910 tonnes (27 971-68 032)
et densite (tonnes/km^2)	0.117 (0.068-0.165)	0.115 (0.067-0.163)
Tonnage estime pour la ZEE	154 566 tonnes (90 440-219-295)	67 663 tonnes (39 502-96-082)

4 CPS Commission Pacifique sud (Noumea, Nouvelle-Caledonie)
5 FIS Flotille thoniere française, ivoirienne et senegalaise

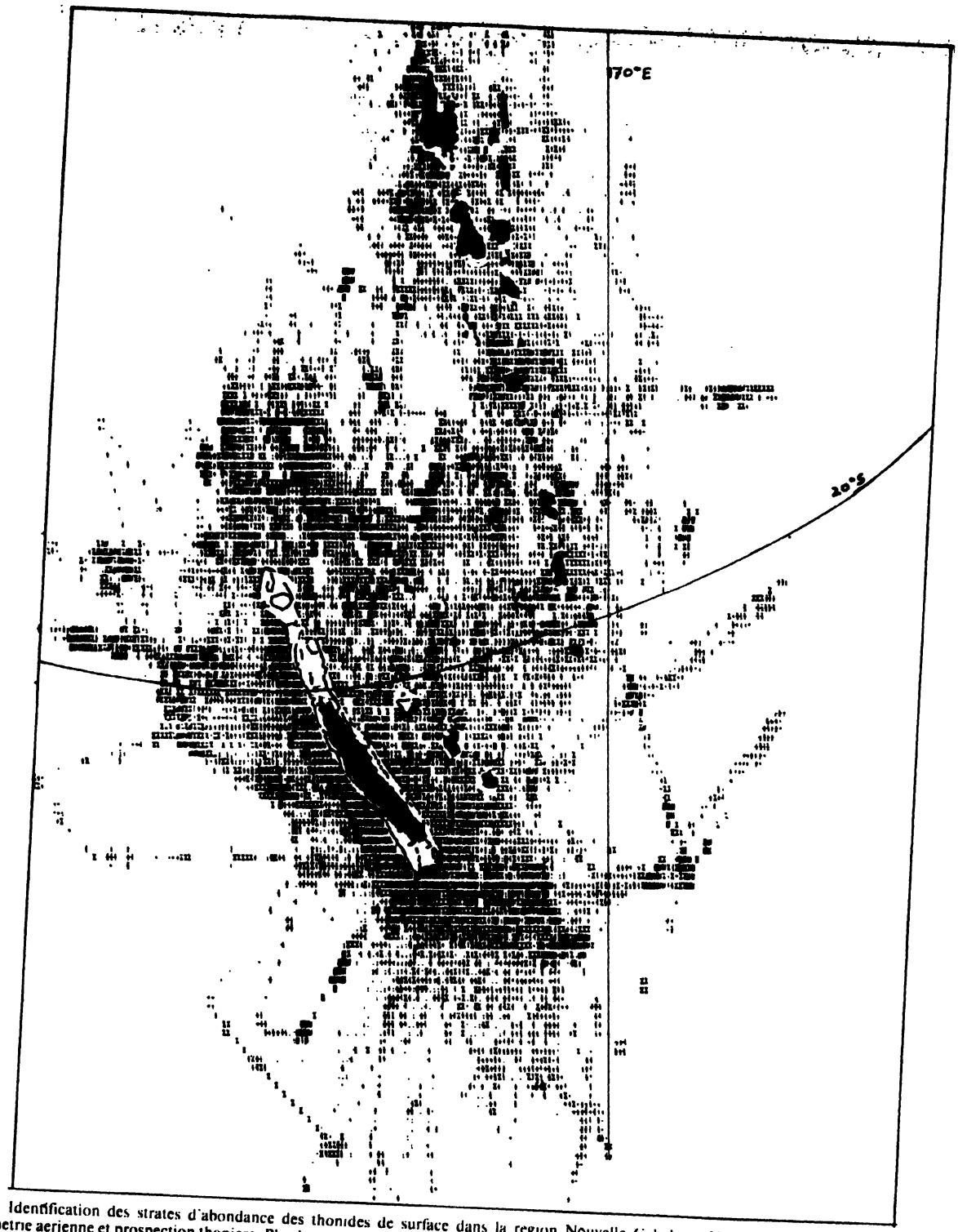


Fig. 2. Identification des strates d'abondance des thonides de surface dans la region Nouvelle Calédonie-Vanuatu a partir des operations de radiometrie aerienne et prospection thoniere. Plus le « caractere » est dense, plus la zone correspondante presente un fort potentiel en concentration de thonides (Petit, 1984b)

Historiquement le territoire de Nouvelle-Calédonie a signé avec l'ORSTOM une convention, plusieurs fois réconduite entre 1979 et 1982, pour executer des études de radiométrie infra-rouge et d'observations aériennes.

Le principal objectif de ces recherches financées par le FIDES[6] et la Marine marchande, était d'évaluer les potentialités des ressources thonières des régions centrées sur les ZEE de Nouvelle Calédonie et de Wallis et Futuna en vue d'un developpement de la pêche.

Ces regions, comme l'ensemble du Pacifique sud, avait a l'époque une thermographie de surface mal connue et une pêche thonière limitée à celle des canneurs japonais.

Dès 1979, les premiers résultats exposés a la commission Pacifique sud ont suscité des demandes d'opérations du même type de la part de certains pays membres. L'ORSTOM a ainsi passé un accord avec le Vanuatu (1980, financement par le ministere des Ressources Primaires) puis avec la Polynésie française (1981, fi-

6 Fonds d'investissement pour le Développement Economique et Social

nancement Fides). Enfin, en eté autral 1983, le gouvernement neo-zélandais a demande à l'ORSTOM la mise en place de cette technique sur l'avion affrete par les senneurs américains, l'objectif devenant alors l'aide a la pêche directe.

Au total, près de 2 400 heures de vol ont été réalisées dans la région (tableau n° 1). Notons que cette technique de radiométrie aérienne et prospection thonière (RAPT) est utilisée globalement ou partiellement depuis longtemps par de nombreux laboratoires français (ORSTOM, IFREMER, Universités, Météorologie nationale) et etrangers (Japon, USA, Australie...) (Marsac *et al.* 1987).

Brièvement, le mode opératoire est le suivant : le plan de vol est etabli apres examen des donnees historiques variées (hydrologie générale, statistiques de peche), des divers documents decrivant la situation thermique recente (temperature de surface transmise par les navires marchands, cartes satellites), des enseignements tires des vols précedents (temperature de surface relevee, pêche, meteorologie locale). La zone a prospecter est donc definie, mais le trajet au sein de cette zone peut toutefois être modifie au cours du vol en fonction des evolutions thermiques ou meteorologiques qui se manifestent : la recherche des conditions optimales de prospection est un element fondamental du succes et de la rentabilité des vols.

Un vol est composé d'une succession de trajets lineaires ou radiales effectues a une altitude de 500 pieds (150 metres): chaque releve est effectue le long de ces radiales.

Au cours du vol, toutes les cinq minutes (soit tous les 10 milles), ou a chaque évenement rencontre (par evenement, nous entendons tout banc de thons, objet flottant, ou phénomene particulier survolé, a savoir : les fronts thermiques, les changements de couleur de l'eau, les mammiferes marins, les oiseaux, les epaves, thoniers en pêche...) sont releves :

- la nature de l'evenement lui-même
- l'heure
- la nebulosite (pour la correction atmospherique)
- la temperature de surface de la mer apres les corrections instrumentale et atmospherique
- la position
- le cap suivi
- l'état de la mer
- la couleur de l'eau
- la vitesse et la direction du vent
- la distance d'observation des bancs par rapport a l'axe de vol.

Ces données sont saisies en cours de vol, en partie automatiquement en ce qui concerne la valeur de la temperature de surface issue du radiometre et la position, en partie manuellement sur le micro-ordinateur pour les autres parametres.

2.1.2. Résultats directs

La radiometrie aérienne infra-rouge, en permettant de localiser les anomalies thermiques de surface, focalise l'observation aérienne sur les zones privilégiees ou les thonidés présents ont tendance à se rassembler. Par l'inventaire de ces sites, cette méthode de prospection donne trois types de résultats qui concernent l'écologie des thonidés, l'évaluation et la répartition d'abondance, et l'estimation, en temps réel, de la richesse de la region prospectée, pour la pêche (Petit et Kulbicki, 1983; Petit et Henin, 1982; Petit, 1984).

Notamment, il a ete confirmé que, dans la region, lorsque zones frontales et thonidés sont presents, ceux-ci se concentrent près de celles-là. L'effet agregatif des îles et hauts-fonds a egalement été mis en évidence. L'ensemble de ces observations a permis d'élaborer une theorie unitaire sur le comportement des thonides (Petit, 1985).

L'évaluation en temps réel du potentiel halieutique des zones survolées à l'aide à la pêche directe ont ete pratiquees à plusieurs reprises au cours de ces opérations : en Nouvelle-Zélande avec les senneurs américains, a Tahiti avec les bonitiers ou encore avec les compagnies locales de pêche à la canne en Nouvelle-Calédonie.

Le résultat principal de ces opérations est la mise au point d'une methode d'evaluation du stock de thonides de surface et son application à la Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu. Cette methode intègre un modele mathematique qui tente de tenir compte aussi bien de l'influence des différents parametres du vol (heure, temperature de surface, nebulosite, état de la mer, distance à la côte, distance entre bancs, saison) que du caractere discontinu des observations (bancs de thons, oiseaux, baleines, dauphins...). Ce modele définit une distance mathematique « δ » qui ramène a une dimension l'ensemble des paramètres retenus pour l'analyse. Par ajustement d'une courbe a ces donnees, on peut alors calculer la relation existant entre cette distance δ et la probabilite d'observation (« P.O. = potentiel observable »), utilisee comme indice d'abondance. Il s'en déduit une relation entre δ et la densité en thons à partir de l'évaluation de la taille des bancs et de la surface prospectée. Il a été montré que ces deux relations sont de forme exponentielle.

Enfin, à partir de cette densité estimée, l'évaluation du potentiel en thons de surface peut être faite. Le tableau n° 2 donne le résultat de l'application de cette méthode à la région Nouvelle Calédonie/Vanuatu. (Petit, 1984a et b). Selon ce modèle, le stock de surface s'élève pour la ZEE de Nouvelle-Calédonie à 155 000 tonnes (avec un intervalle compris entre 90 000 et 220 000 tonnes) et pour celle du Vanuatu à 68 000 tonnes (avec un intervalle compris entre 40 000 et 96 000 tonnes) ce qui représente une densité d'environ 0,12 tonnes/km^2. Les résultats obtenus par le programme de marquage de la CPS, pour toute la zone CPS, donne une densité comparable pour l'ensemble du stock (surface + profondeur) de 0,1 tonne/km^2. La figure 2 visualise bien l'identification des strates spatiales à fort pouvoir de concentration en thonidés qu'a permise l'emploi du modèle précédemment décrit.

2.1.3. Utilisation des données RAPT comme vérité-terrain des données satellitaires :

Dans une region aussi mal connue que le Pacifique sud-ouest, nous avons eu quelques difficultes à optimi-

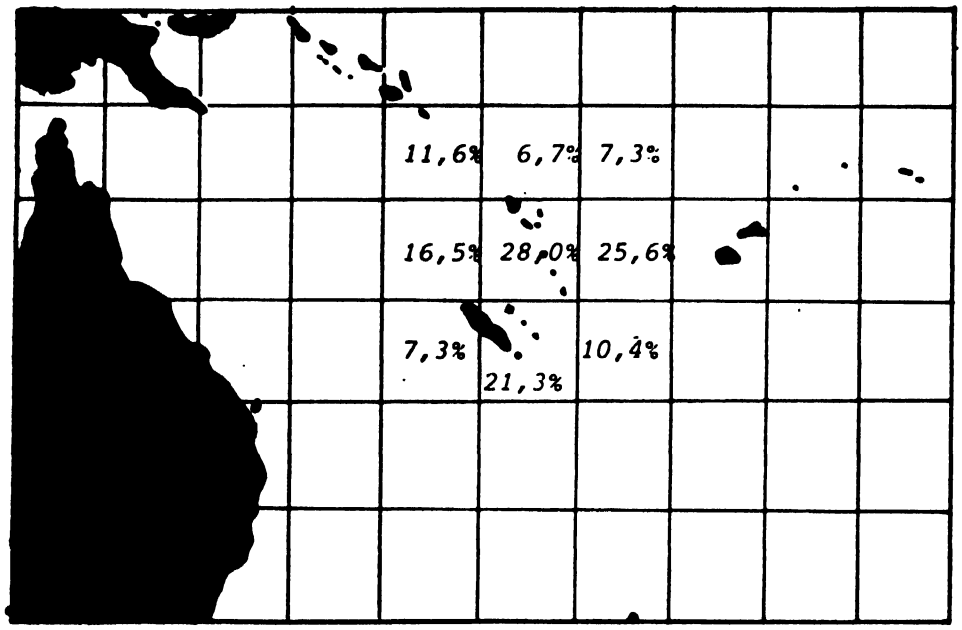


Fig. 3. Frequences des semaines presentant un front de type 3 ou plus en % des 164 semaines etudiees (voir texte)

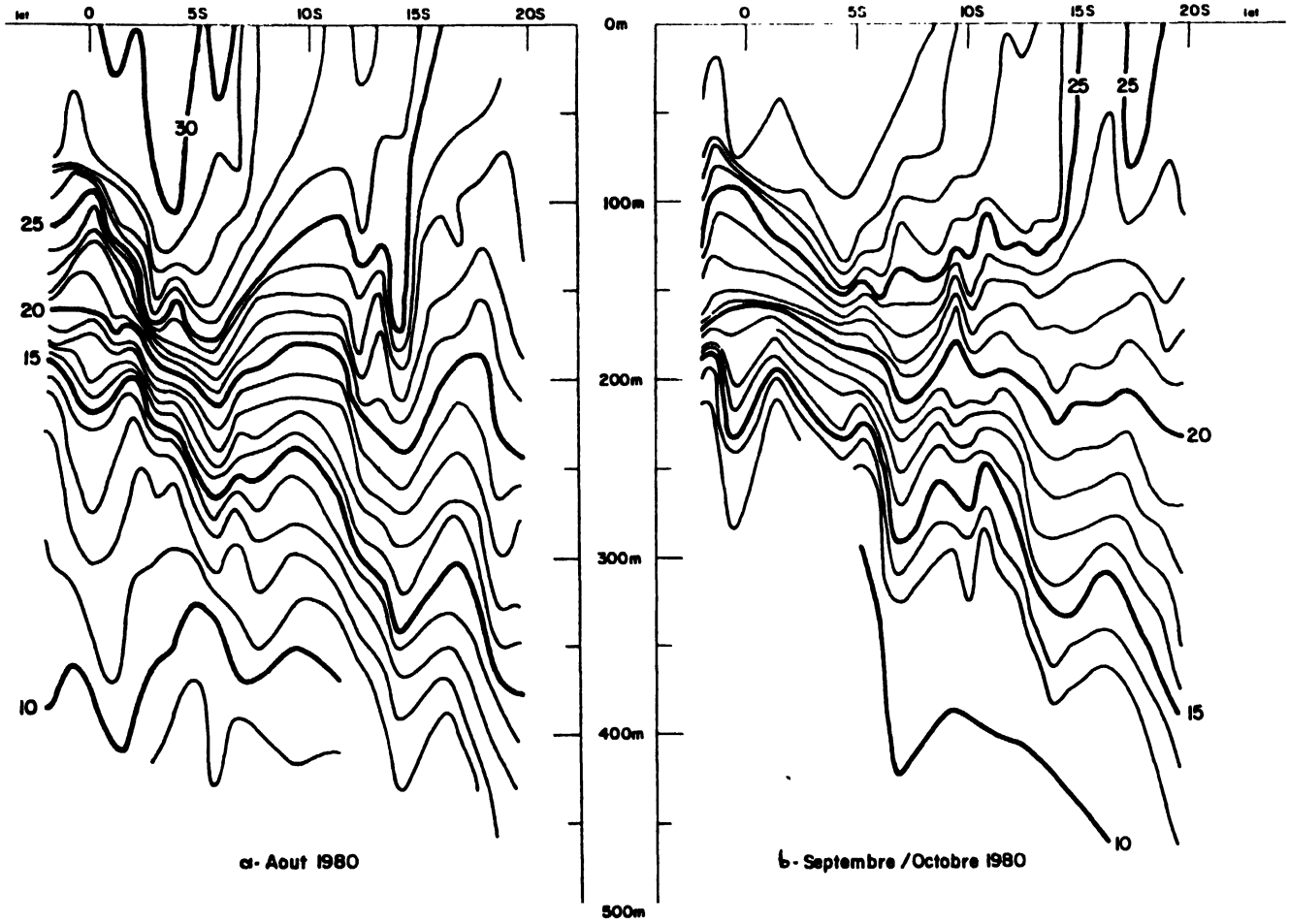
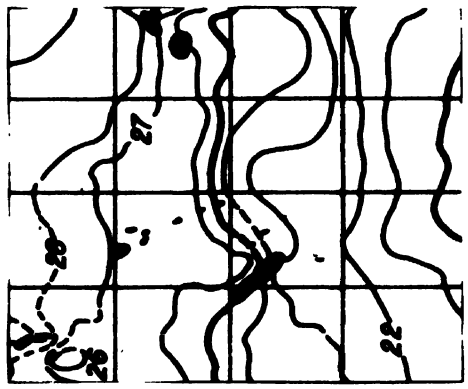


Fig. 4. Coupe thermique etablie a partir des donnees des navires marchands de la ligne Noumea-Japon

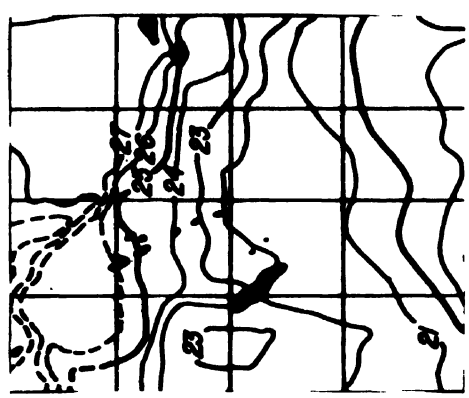
ser la programmation des vols et dès 1979, nous avons essayé d'obtenir des données satellitaires en temps réel. Compte tenu de l'altitude de l'avion, des techniques d'observation et de la précision thermique que nous obtenons du radiométrique (0,2°C), la méthode RAPT assure partiellement sa « vérité-terrain ».

En 1979, les seules données thermiques satellitaires disponibles étaient les cartes Gosstcomp[7] fournies par la NOAA par voie postale. A partir de ces cartes hebdomadaires de température de surface une étude

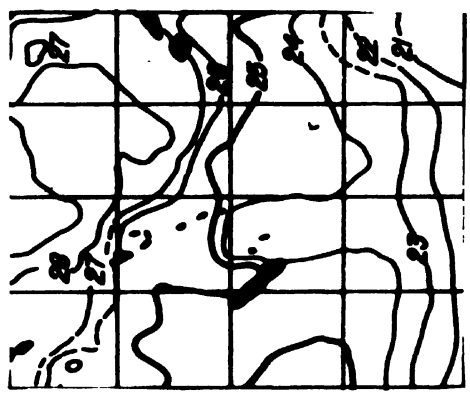
7 GOSSTCOMP Global Operational Sea Surface Temperature Computation



du 15.10.80
au 21.10.80

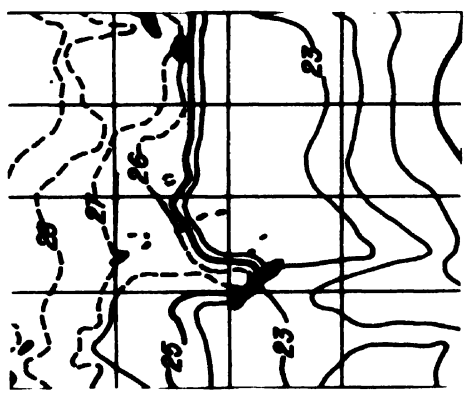


du 22.10.80
au 28.10.80

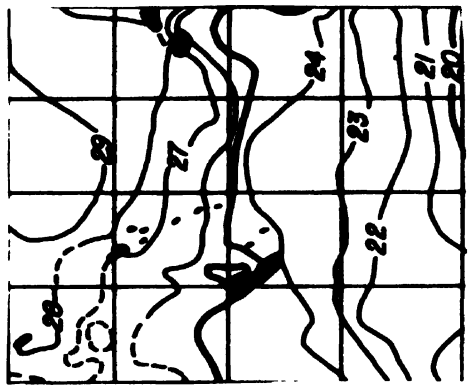


du 29.10.80
au 04.11.80

Semaine
du 05.11.80
au 12.11.80



Semaine
du 13.11.80
au 18.11.80



Sem
du 19.11.80
au 25.11.80

Semaine
du 26.11.80
au 02.12.80

Fig. 5. Temperature de surface entre le 15-10-80 et le 2-12-80 (cartes NOAA-GOSSTCOMP dans la region du Vanuatu)

(Petit et Henin, 1984) a été faite dans le cadre de la convention avec le Vanuatu : « *L'analyse porte sur 16 semaines (de janvier 1979 à juin 1982) et montre que l'est de la mer de Corail est le siège de fronts thermiques superficiels qui traversent les archipels ni-vanuatu et fidjien. Ces fronts peuvent se déplacer rapidement selon les conditions hydroclimatiques, ce qui laisse supposer une advection rapide des eaux de surface.*

Nous considérons la zone allant de 10° à 25° et de 160°E à 180°. Notre analyse est faite par région de cinq degré-carré. Par définition, nous estimons qu'il y a un front thermique lorsque trois isothermes ou plus traversent une surface de 5° de longitude par 2°30' de latitude. Nous parlerons alors de « fronts de type 3 ou supérieur à 3 ». Les résultats dans la zone considérée sont les suivants (figure 3) :

— sur 164 semaines étudiées de 1979 à 1982, il y en a 118 (soit 72 %) qui présentent au moins une situation frontale de type égale ou supérieure à 3. Les fronts de type 4 représentent le tiers de ces situations;

— plus de 80 % des fronts affectent l'isotherme 25°C et 41 % sont centrés sur l'isotherme 25°C;

— la fréquence la plus élevée (28 %) de situations frontales est rencontrée dans le carré centré sur le Vanuatu;

— lorsqu'une situation frontale est presente dans la zone d'étude, le nombre moyen de carrés (5° X 5°) affectés par celle-ci est de 1,87;

— en moyenne la fréquence des semaines à situation frontale est de :

2 semaines/mois en janvier, février, mars

3 semaines/mois en avril, mai

3,5 semaines/mois en juin

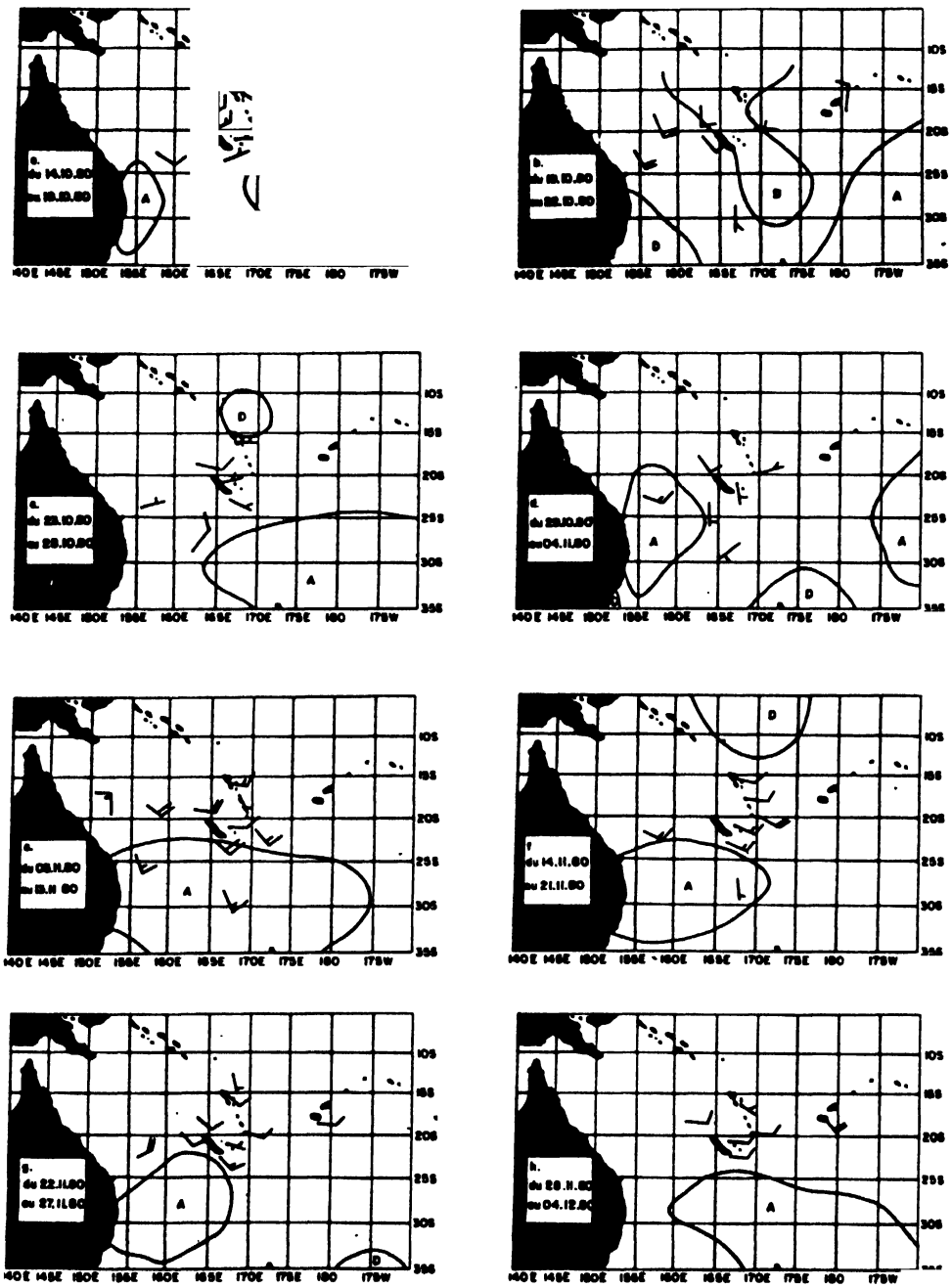


Fig. 6. Conditions meteorologiques entre le 15-10-80 et le 4-12-80 dans le Sud Ouest Pacifique

4 semaines/mois de juillet, août, septembre
4,6 semaines/mois en octobre
4,3 semaines/mois en novembre
4 semaines/mois en décembre.

Deux types de situation se sont souvent répétées :

— La première correspond à un front zonal très marqué, stable et situé souvent dans le nord de la région. Nous le trouvons par exemple, entre août et octobre 1980 vers 15°S. Les relevés thermiques (bathythermographe et température de surface) des navires marchands de la ligne Nouméa-Japon ont permis de vérifier son existence et la coupe verticale correspondante (fig. n° 4) montre l'épaisseur importante des masses d'eau en présence (120 m). Ce type de situation est probablement dû au système Courant/Contre-Courant Equatorial Sud (CES et CCES). Sa durée de vie est comprise entre deux et trois semaines mais en 1980 sa stabilité a atteint 10 semaines (août à octobre). Pour les 164 semaines analysées, 48 situations frontales ont été répertoriées et 36 % correspondaient à ce type.

— la seconde (31 % des fronts repertories) concerne généralement le chenal des Hébrides. Sa durée de vie est egalement comprise entre deux et trois semaines. Elle est caractérisée par la forme en langue des isothermes. Les campagnes océanographiques (Hydrothon 03, Circal, etc) (Henin et al, 1982; Henin, 1980) ont pu etablir qu'il s'agissait généralement d'un front thermohalin et que la thermocline se situait alors entre 60 et 80 m. L'action du vent et du courant est déterminante pour la frontogénese dans ce secteur Compte-tenu de son importance pour la pêche des thonides, nous donnons ici un exemple de relation etroite entre regime d'alizé, courant sud-est et formation d'un front de ce type (fig. n° 5 et 6) :

La période qui s'étend d'octobre à décembre 1980 constitue une intersaison marquée par un rechauffement progressif que l'on suit aisément par les isothermes 24, 25 et 26°C. L'effet du Contre Courant Tropical Sud (CCTS) portant au sud-est est bien mis en evidence a l'est de la Grande Terre.

Jusqu'au 4 novembre 1980, la rechauffement s'opere régulièrement. L'isotherme 23°C est repoussé jusqu'à 27°S a la longitude de la Nouvelle Caledonie. Le vent de sud-est reste faible (autour de 5 nœuds).

Dès le 5 novembre 1980, un fort anticyclone centre au nord de la Nouvelle Zélande dirige vers la Nouvelle Calédonie des alizes de 15 à 20 nœuds. Ce flux intense persiste jusqu'au 21 novembre, puis commence à faiblir dans les semaines qui suivent. A l'est de la Nouvelle Caledonie, l'avancee des eaux chaudes se heurte alors à un mouvement vers le nord d'eaux plus fraiches (marquee pour les isothermes 22 et 23°C). On assiste à une « compression » des isothermes de 23 à 26°C, qui se relâche lorsque le vent faiblit (du 19 au 25 novembre). Le front finit par disparaitre dans la semaine du 26 novembre au 2 décembre 1980.

Ce type de front est donc très lié au régime du vent : il nait sous l'effet d'alizés suffisamment forts (autour de 20 nœuds) et se disloque lorsque ceux-ci faiblissent.

Compte-tenu de la régularite du scénario de frontogénèse dans ce secteur la prévision de la formation des structures frontales est envisageable ».

Cette etude a également mis en relation la presence des fronts avec les concentrations en thonides et donné une explication partielle à leur variation spatio-temporelle d'abondance.

Les cartes GOSSTCOMP, dont la qualite n'a fait que croitre entre 1979 et 1984, restaient les seules données thermiques satellitaires que nous recevions regulierement par courrier avec 2 a 3 semaines de retard. Ce retard en limitait serieusement l'exploitation.

Ceci explique pourquoi des 1979 nous avons cherche a obtenir des données satellitaires en temps réel et que la convention avec la Nouvelle Caledonie a comporte l'etude d'un projet de la mise en place d'une station de reception secondaire (APT[8]) qui est finalement a l'origine du projet d'installation d'une station HRPT[9] a Noumea (projet TEMPO).

Des 1980, des contacts ont eté etablis avec la station de reception HRPT de Wellington et en 1983 les vols de radiometrie ont servi occasionnellement de verite-terrain pour l'établissement de cartes de temperature de surface (fig. 7). Cependant la zone d'acquisition de cette station etait un peu trop sud par rapport a notre zone d'etude (fig. 1). C'est également le cas avec celle de Melbourne qui nous a cependant fourni la première image HRPT de la province neo-calédonienne.

Devant l'absence de station HRPT dans la region — puisque a part celles de Wellington et de Melbourne, les autres (Noumea, Townsville...) etaient en projet et ne sont toujours pas operationnelles — nous nous sommes tournes vers l'exploitation en differe de donnees GAC[10] acquises par satellites de la serie TIROS N de la NOAA. Ce type de donnees correspond a une degradation de la resolution spatiale des donnees haute resolution en moyennant quatre points sur cinq pris toutes les trois lignes. Cela ramene la resolution a 4 km environ au nadir. Cet echantillonnage est fait à bord du satellite ou il est stocke pour l'ensemble du globe. La retransmission en differe est faite chaque jour aux stations de commande de Wallops (Virginie, USA) et de Gilmore Creeck (Alaska, USA). Notons que seule la resolution spatiale est degradee et qu'en revanche, le pouvoir separateur et le nombre de canaux acquis sont conserves.

Une petite etude sur une dizaine d'orbites type GAC a ete realisee en 1984 (Champagne, 1984) avec des moyens calculs tres peu adaptes pour ce travail. Son but etait de savoir s'il serait possible, a partir d'une station HRPT, de suivre les zones de convergences et de divergences et d'ameliorer nos connaissances sur la circulation superficielle par l'etablissement de cartes de temperatures de surface. Là encore, les donnees de radiometrie aerienne ont servi de verite-terrain (fig. 8). La principale conclusion de cette etude est que, contrairement a une opinion repandue (mais comme l'avait laisse prevoir les resultats des operations de RAPT), il est possible de mettre en evidence et de suivre un nombre important de phenomenes oceaniques regionaux a partir de donnees satellitaires tels que la position et l'intensite des zones de divergences et de convergences. En plus de l'halieutique hauturiere, ceci devrait également susciter de l'interet en hydroclimatologie pour les etudes des phenomenes de type ENSO (El Niño Southern Oscillation).

---

8 APT Automatic Picture Transmission
9HRPT Hight Resolution Picture Transmission
10 GAC Global Average Cover

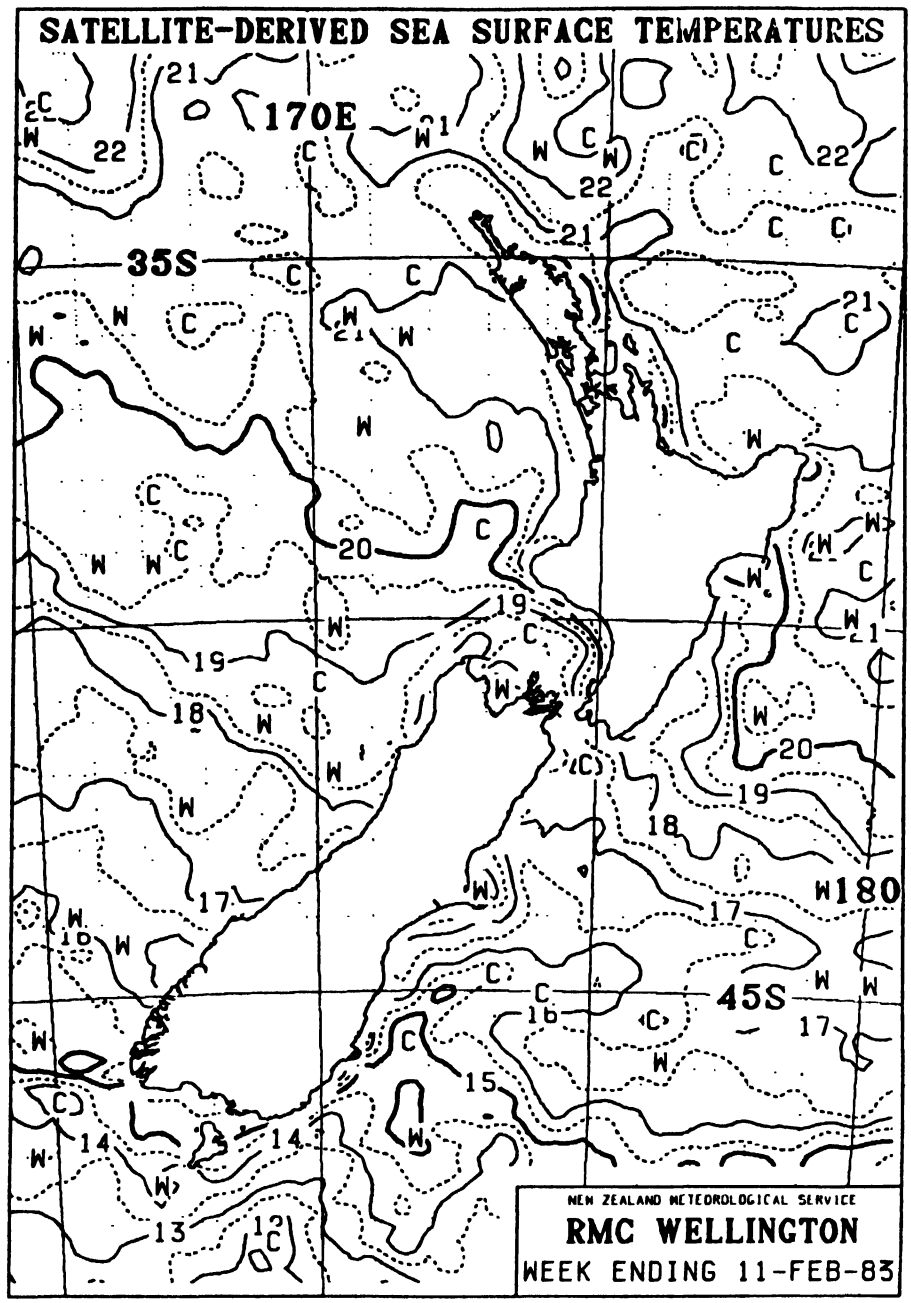
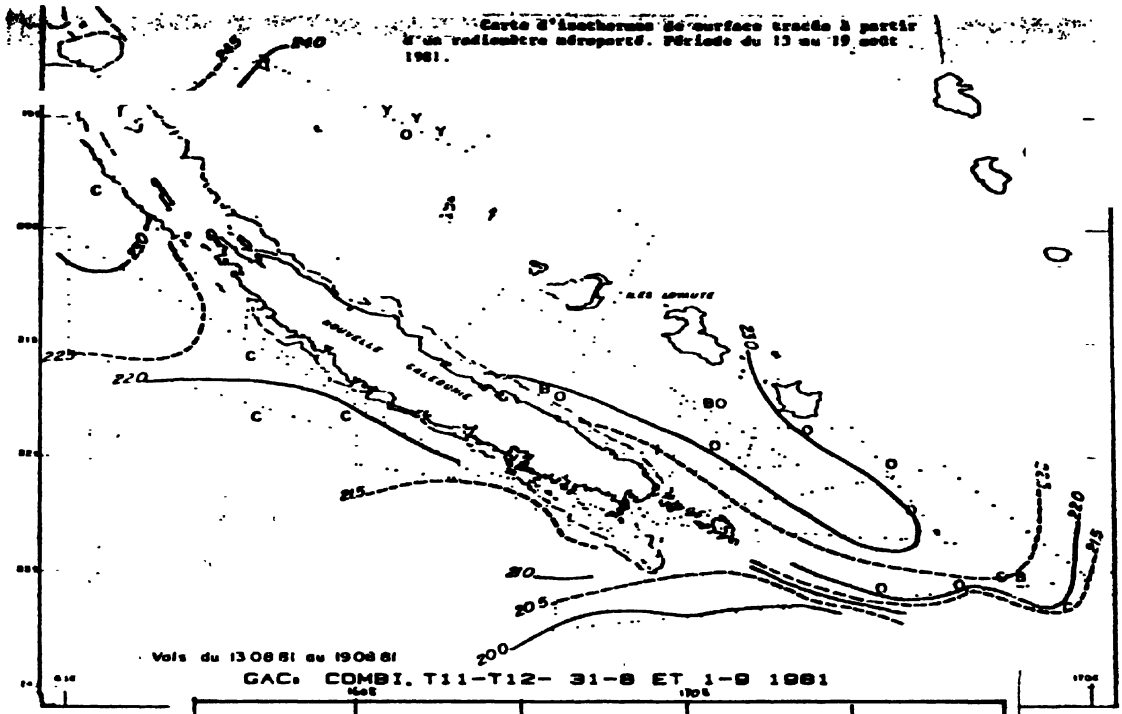


Fig. 7. Carte de température de surface etablie a partir des donnees satellitaires GAC et comparees aux donnees RAPT. Fin aout 81

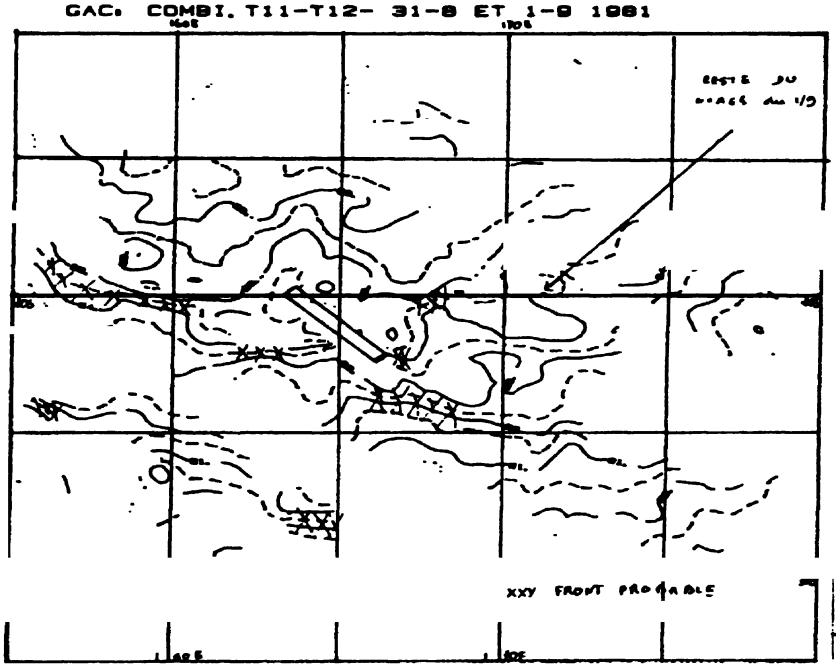
Enfin les opérations RAPT ont encore fourni, de façon plus inattendue, a deux reprises les donnees de vérite terrain.

Tout d'abord ces vols ont permis de visualiser le phénomène de surchauffe, par temps très calme, de la pellicule superficielle de l'océan en créant ainsi les différences de temperatures de l'eau de plusieurs degrés entre cette mince pellicule et la masse d'eau sous-jacente ou voisine. Ceci intéresse surtout les études de bilan radiatif et se trouve un peu eloigné des préoccupations de l'halieutique.

En revanche, plus intéressant a été l'exploitation du paramètre couleur de l'eau relevé au cours des vols de RAPT. En effet, dès les premiers vols en février 1979, nous avons remarqué — et décidé de coder — la présence en surface de filaments de plusieurs kilomètres de long sur quelques mètres de large — leur couleur, souvent hétérogène, va du jaune vert au brun, parfois orange. Ces filaments sont généralement observés près des lignes de courants et par mer calme, dans la partie chaude des fronts thermiques. L'origine de ces filaments a pu être identifiée à des blooms phytoplanctoniques de type *cyanobacteria*. Il a été démontré (Petit et Henin, 1982; Dupouy *et al*, 1988) que ces formations phytoplanctoniques sont statistiquement plus importantes en saison chaude dans la region est caledonienne-sud-hébridaire. C'est dans ces régions que la fréquence des fronts thermiques, établie à partir de l'analyse des cartes GOSSTCOMP (cf § 2.13), est plus élevée. Ce phénomène, bien qu'intéressant pour l'halieutique, puisque qu'il met en évidence des zones à forte productivité, restait anecdotique tant que l'on ne pouvait évaluer son ampleur et sa répartition. Une étude récente réalisée par Dupouy *et al* (1988) vient de valoriser pleinement ces observations par l'exploitation d'images concomitantes



GAC: COMBI. T11-T12- 31-8 ET 1-9 1981



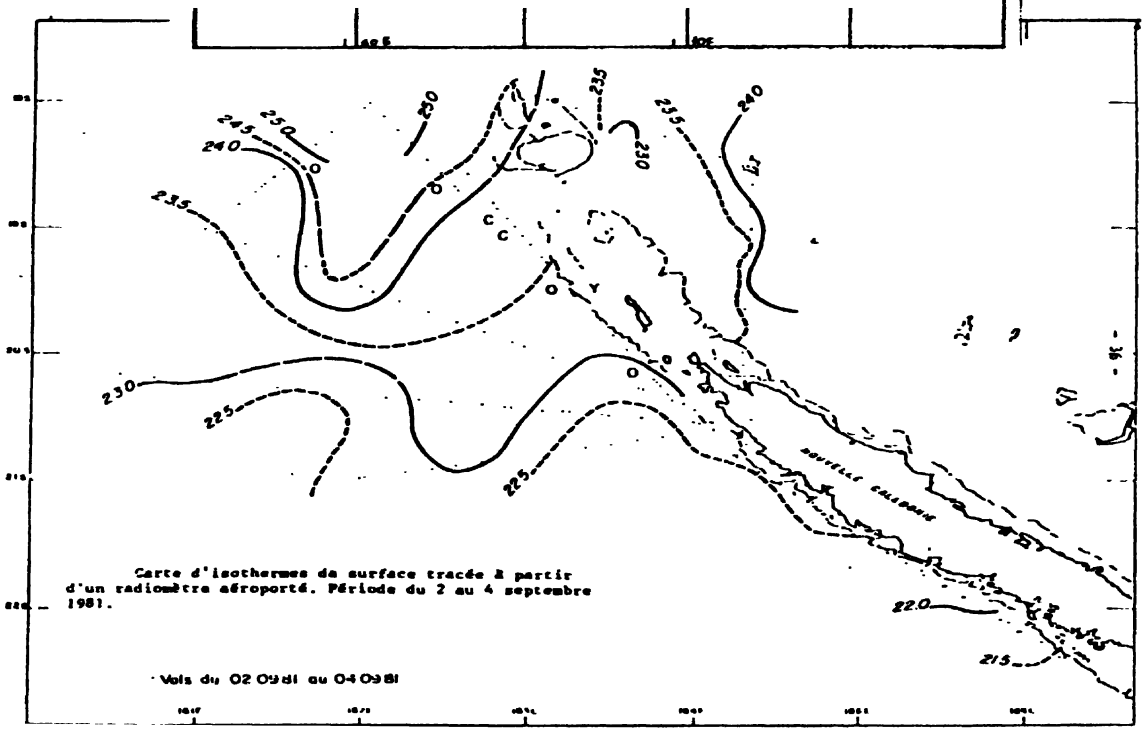


Fig. 8

du capteur CZCS[11] du satellite NIMBUS[7]. L'une d'entre elles montre que le bloom phytoplanétonique, repéré par les observations de radiométrie aérienne, s'étend sur une surface de 90 000 km autour de la Nouvelle Calédonie et du Vanuatu. A partir de ces images, les auteurs ont pu estimer que la fixation d'azote liée à la présence de ce bloom représenterait 60 % de la fixation annuelle pour le Pacifique dans sa totalité, alors que ce phénomène était supposé mineur (Capone et Carpentier 1983). Ainsi, les images satellites sont probablement l'outil idéal pour observer et évaluer les aires atteintes par ce type de bloom et surtout pour recenser la fréquence du phénomène.

Ces deux derniers exemples montrent bien combien la télédétection aérienne et la telédetection spatiale peuvent être complémentaires particulièrement dans une région aussi vaste et mal connue que le Pacifique ouest.

2.2. Autres programmes

D'autres programmes de recherche concernant peu ou prou la télédétection et l'halieutique hauturière ont été developpés dans les regions voisines de celle qui nous intéressent.

2.2.1. Le programme Germon du Pacifique sud

Conçu depuis la campagne exploratoire du NO Coriolis en 1982 (Hallier et Le Gall, 1983), ce programme est a l'initiative de quatre organismes : l'ORSTOM (France), la FRD[12] (Nouvelle-Zelande), le NMFS[13] (USA) et la CPS. Le germon (*Thunnus alalunga*) est l'un des thons les plus sensibles, dans la phase immature de son cycle, aux variations de température de surface (Aloncle, 1973; Le Gall 1974) et, dès lors, sa pêche et sa prospection ont beaucoup a attendre de la

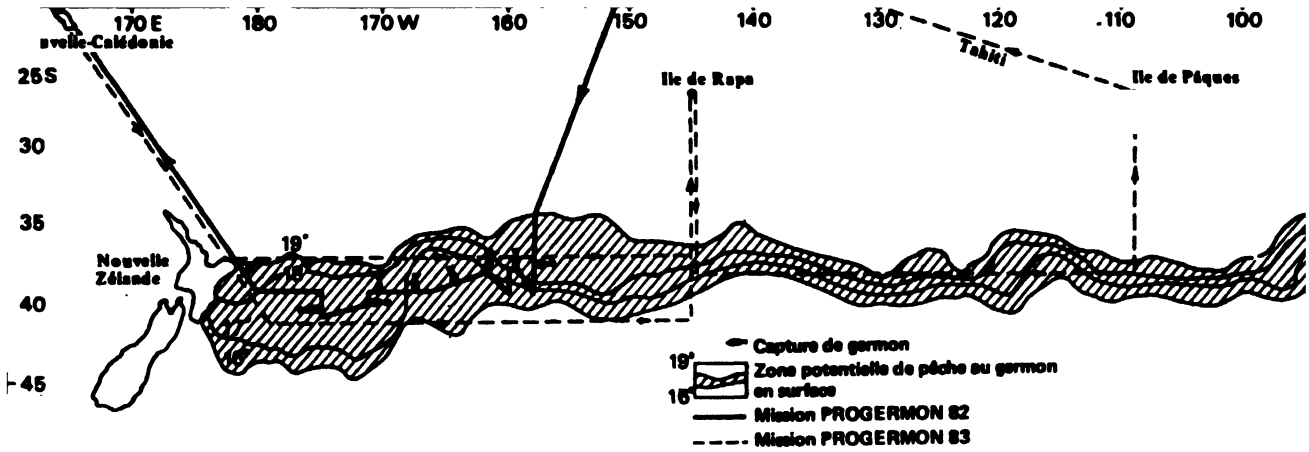


Fig. 9. Zone de pêche potentielle du germon dans le Pacifique sud central (*in* Hallier et Legall, 1983)

télédétection aérospatiale (Petit, 1976). Dans le Pacifique sud, il a été démontré que les prises de germon étaient réalisées dans la zone de convergence subtropicale qui correspond à un front thermique (entre 16 et 19°C) très net parfaitement identifiable sur les cartes issues de données satellite même si elles ont la qualite des cartes GOSSTCOMP (fig. 9).

2.2.2. Emploi de la télédétection pour les unités de pêche japonaises

Depuis une dizaine d'années environ, l'intérêt des scientifiques japonais a l'intégration des données de télédétection aérospatiale en océanographie et halieutique n'a fait que croître (Doumenge, 1987). Ceci s'est manifesté par une série de programmes, durant le plan quinquennal de 1976 à 1981, chargé justement de cette intégréation. Dans ce cadre, les premières zones-tests ont été localisées près du Japon (fig. 10) : par exemple le suivi de la limite du KURO SHIO réalisé par l'équipe du professeur Toba de l'Université de Tohoku en liaison avec le TRFRL[14].

Avec le lancement du satellite MOS 1 en 1987 et la préparation de MOS 2, la dynamique de recherche s'est fortement accélérée : la création de groupe de travail tant pour les capteurs classiques (MOS 2 Ocean Colour Temperature Working Group) que les capteurs actifs (scatterometre) et la parution de nombreuses publications (Akiyama *et al.*, Hirozawa, 1984) en sont la demonstration.

Compte tenu (a) de la pratique traditionnelle de la pêche en flottilles integrees ou toutes les unites communiquent et travaillent ensemble en permanence, (b) de l'imbrication entre applications et recherches et (c) de l'importance économique de la pêche au Japon, on peut penser que les programmes japonais, notamment ceux du JAFIC[15] devraient s'etendre rapidement sur l'ensemble des pêcheries thonieres.

2.2.3. Les stations AVHRR australiennes

Le WAIT[16] a développé à partir de sa station HRPT, operationnelle depuis juillet 1982, un programme triennal (1984-1987) de surveillance de l'environnement océanique en collaboration avec les pêcheurs de thon rouge, les compagnies de prospection aerienne et les armateurs. L'approche est des plus classiques : on étudie la couverture nuageuse et la température de

11 CZCS Coastal Zonal Color Scanner
12 FRD Fisheries Research Division (Nouvelle Zelande)
13 NMFS National Marine Fisheries Service (USA)
14 TRFRL Tohoku Regional Fisheries Research Laboratory
15 JAFIC Japan Fisheries Information Service Centre
16 WAIT Western Australian Institute of Technology

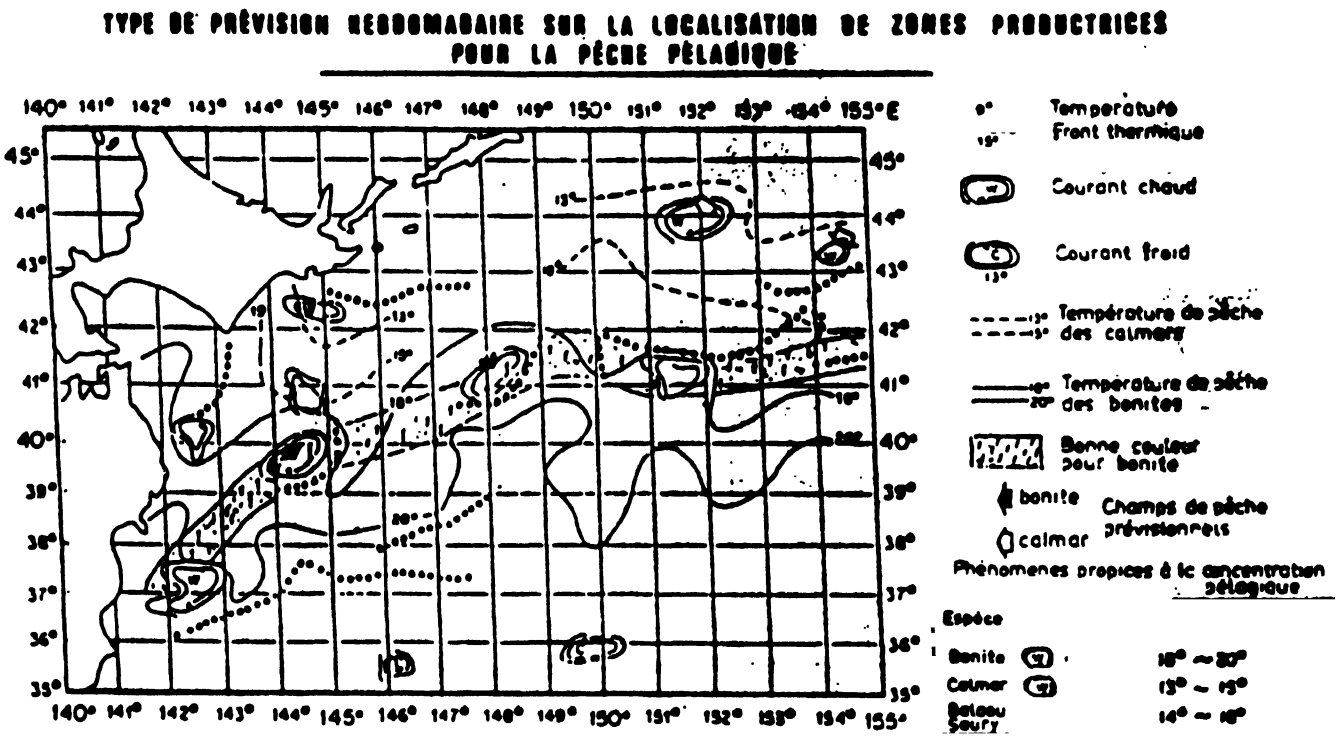


Fig. 10. Informations de prediction de zones de pêche diffusées par le Japan Fisheries Center (JAFIC)

surface a partir des donnees des satellites NOAA; la verite terrain (temperature, nuages et prises de thonidés) est fournie par les cahiers de pêche, les cartes issues des images satellites sont transmises par fac-simile aux pêcheurs (Podmore *et al.* 1984). Bien que la station de Perth ne concerne que l'ocean Indien est et le sud de l'Australie et soit donc en dehors de notre zone d'etude, il faut savoir que le NADIS[17] s'est equipe, a Townsville, mi-87, d'un systeme de reception AVHRR[18] de type SAT-TRAC tout-a-fait comparable a celui de Perth. La zone d'acquisition depuis Townsville est, à l'heure actuelle, celle qui interesse le plus notre zone d'etude (fig. 1) pour la reception des donnees NOAA-AVHRR (anonyme, 1987).

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La teledetection aerienne en halieutique hauturiere – i.e. les operations de RAPT pour l'essentiel – en gestation pendant plusieurs années dans les centres ORSTOM africains et dans les centres du NMFS (USA) sur la côte Californienne, s'est epanouie dans le Pacifique sud ouest avant d'être exportee dans l'ocean Indien. Cette evolution, apparait logique lorsque l'on se refère à l'ordre de grandeur des surfaces respectives a prospecter, à la comparaison du coût d'une donnee « bateau » et d'une donnée « avion » et aux faibles possiblités d'acquisition de donnees satellitaires de bonne qualite. Ces opérations de RAPT ont rempli leur rôle de prospection tout en developpant une methode originale d'évaluation de l'abondance des thonides de surface et contribuent a l'elaboration des bases d'une oceanographie et halieutique aeroportées qui tendent à voir le jour actuellement.

Les operations de RAPT, ont des l'origine, essaye d'integrer les donnees de teledetection spatiale en insistant sur la complementarite « bateau-avion-satellite ». Au vu de l'installation prochaine de nouvelles stations de reception NOAA-HRPT (Townsville et Noumea) et des futurs capteurs (capteur de couleur de l'eau, scatterometre, SAR[19]) embarques a bord des futurs satellites (MOS, SPOT, TOPEX/POSEIDON), la teledetection aerospatiale devrait se developper fortement dans cette region du globe et contribuer au passage attendu d'une halieutique hauturiere experimentale vers une veritable halieutique operationnelle.

4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aloncle H. et F. Delaporte (1975). Donnees nouvelles sur le germon dans le Nord-Est Atlantique. Rev. Trav. Pêches marit. 37 (4) : 475, 572.

Anonyme (1987). ACRES NEWS, juin 87.

Capone D.J. and E. Carpenter (1982). Nitrogen fixation in the marine environnement. Sciences New York, 217,1140.

Champagne M. (1984). Rapport d'activite (juillet 83 - dec. 84), non publie, ORSTOM Noumea.

Doumenge F. (1987). Deux yeux pour la pêche japonaise : transmission en fac-simile et cartographie thermique satellitaire. La Pêche maritime nov. 87.

Dupouy C., M. Petit et Y. Dandonneau (In press). Satellite detected cyanobacteria bloom in the SW Tropical Pacific. Implication for Nitrogen fixation. Int. Remote Sensing.

Hallier J.P. et J.Y. Legall (1983). Campagne de pêche exploratoire au germon de surface dans l'ocean Pacifique sud central et occidental. Lettre d'Inf. sur les Pêches n° 24. CPS Noumea.

17 NADIS North East Australian Satellite Imagery System
18 AVHRR Advanced Very High Resolution Radiometer

19 SAR Synthetic Aperture Radar (Radar a Ouverture Synthetique)

Henin C. (1980). Resultats de la campagne HYDROTHON 03. RST oceano n° 10. ORSTOM Noumea.

Henin C., L. Chabert et J.M. Guillerm (1982). Observation de surface a bord du N.O. Vauban. R.S.T. oceano n° 25. ORSTOM Noumea.

Kearney R.E. (1978). Le programme d'étude et d'evaluation des stocks de bonites de la CPS. Document de travail n° 11. Conférence annuelle. CPS-Noumea.

Kleiber P., A.W. Argue and R.E. Kearney (1987). Assessment of Pacific Skipjack tuna ressources by estimating stocks and compoments of population turnover from tagging date. Can. Journ. Fish. Aquat. Sci. 44 (6) : 1122-1134.

Legall J.Y. (1974). Expose synoptique des donnees biologiques sur le Germon de l'ocean Atlantique. Synopsis FAO. FIRS/S109.

Marsac F., M. Petit et J.M. Stretta (1987). Radiometrie aerienne et prospection thoniere a l'ORSTOM, methodologie, bilan et prospective. IDT n° 68. Teledetection 12. ORSTOM Paris.

Maugham P.M. (1972). The impact of remote sensing date on the U.S. menhaden and shrimp fisheries. Final report prepared for spacecraft oceanography project. n° 62306-71-C-0173 Earth Sat. Corporation, Washington.

Mendhelson R. and C. Roy (1986). Environmental influences on the FISM tuna catches in the gulf of Guinea, pp. : 170-188. *In* Proceedings of the ICCAT Conference on the International Skipjack Program. (P.E.K. Symons, P.M. Miyake and G.T. Sakagawa Editors) ICCAT 388 pp.

Petit M. (1976). Ecologie du Germon et Teledétection aerospatiale. DAA halieutique a l'Ecole Nat. Sup. Agronomie. 72p. ENSAR-Rennes.

Petit M. (1984a). Méthode d'evaluation des stocks de thonides de surface à partir des données de radiométrie aerienne et prospection thonière. Application en Nouvelle Caledonie et Vanuatu. Conference extraordinaire sur le thon CPS Noumea.

Petit M. (1984b). Aerial radiometry and tuna survey : a method for evaluation of surface tuna stocks in New Caledonia and Vanuatu aera. 35th Annual tuna conference. Lake Arrowhead. LATTC NMFS.

Petit M. (1986). Coherent theory on tuna behaviour. 37th Annual tuna conference. Lake Arrowhead. IATTC-NMFS.

Petit M. et C. Henin (1982). Radiométrie aerienne et prospection thoniere. Rapport Final Vanuatu. Notes et documents d'oceanographie n° 3 ORSTOM Port-Villa Vanuatu.

Petit M. et M. Kulbicki (1983). Radiometrie aerienne et prospection thonière dans la ZEE de Polynesie française. Notes et documents d'oceanographie n° 20 ORSTOM-Tahiti.

Podmore L., F.R. Honey, P.T. Hyck and D.G. Myers (1984). An evaluation of the potential of NOAA-AVHRR data within tuna industry on the south coast of western Australia. Landsat 84 conference, Proceeding 3rd Australasian Remote Sensing conference.

Postel E. (1969). Repartition et abondance des thons dans l'Atlantique tropical. 109-138. *In* Actes du symposium sur l'oceanographie et les ressources halieutiques de l'Atlantique tropical. Abidjan 20-28 octobre 1966. Organise conjointement par l'Unesco, la FAO et l'OUA. Editions de l'Unesco (Paris).

Stretta J.M. et M. Slepoukha (1983a). Les satellites, l'ordinateur et l'aide a la peche. La Pêche maritime janvier 1983. n° 1258 : 38-41.

5.6 Analyse et limites des méthodes sur quelques cas régionaux

par Jean CITEAU *

* Océanographe de l'ORSTOM affecte au Centre de Recherches Océanographiques de Dakar Thiaroye, BP 2241, Dakar (Senegal)

Les méthodes de traitement du signal satellitaire que nous avons utilisées, avaient toutes pour but de restituer selon une certaine échelle de temps et d'espace, la description d'un paramètre géophysique (la température de surface de l'océan) en effectuant une correction des effets dûs à l'absorption atmosphérique.

Il faut cependant garder à l'esprit, que si cette procedure satisfait la communauté des océanographes par la présentation d'un résultat proche de ceux que fournirait une croisière océanographique classique, en revanche il peut arriver que la donnée satellitaire brute (traitée uniquement en termes de rectification geométrique), puisse apporter également une information sur la circulation superficielle ou la disposition de zones frontales, information qu'un traitement trop elaboré aurait pu dégrader.

Quelques situations extrêmes permettent d'illustrer ce propos :

a) Revéles par l'imagerie Meteosat, de nombreux tourbillons se forment fréquemment en hiver boréal le long de la façade maritime senegalo-mauritanienne.

La remontée d'eaux froides dans ces regions et à cette époque fournit un remarquable traceur de ces phénomènes tourbillonaires dont l'échelle de temps est de l'ordre de la semaine et l'echelle d'espace (diametre approché de ces tourbillons) de l'ordre de 40 milles.

En raison de la faible absorption atmosphérique qui prévaut en général dans cette region et a cette epoque, la donnée satellitaire brute révèle déja la majorité de l'information tant pour l'allure des tourbillons que pour celle des grands traits de la structure thermique superficielle.

Dans ces conditions, un traitement par une méthode mulispectrale (données NOAA) ou par une méthode d'ajustement (donnees Meteosat, cf §3) apportera la nécessaire calibration en température et respectera les structures; le poids de la climatologie dans ces traitements restera nul ou faible.

b) En revanche, en éte boréal, la mise en évidence de tourbillons dans ces regions est plus rare, soit que la dynamique du milieu y soit moins favorable, soit au contraire que ceux-ci soient partiellement masqués du fait d'une absorption atmosphérique plus grande, liée a la remontée de la zone de convergence. Il n'y a dans ce cas, guère d'alternative et c'est le recours à la climatologie et à l'analyse objective qui permettra de restaurer une description crédible en champ continu de température de surface; mais, le poids de l'information exogène qui a été introduit (bateaux et climatologie) doit être adapté de façon à ne point se substituer à des traits de circulation à petite échelle.

C'est une telle situation que nous avons rencontree du 25 mai au 30 juin 1987, ou une série de tourbillons (cycloniques) se formant à hauteur des Bissagos se sont déplacés vers le Cap Vert (il est possible que ces tourbillons nes d'un gradient de courant puissent être liés a la cellule du dôme de Guinée).

C'est la discrimination entre mer et nuages qui déterminera les régions où l'information satellitaire sera conservée puis corrigée, et les seuils utilisés seront déterminants pour la restitution des structures fines qui auraient pu être observées.

Dans ce cas, et pour une échelle locale (façade maritime senégalo-mauritanienne), nous avons prefere a procédures quelque peu automatises du traitement, une démarche plus interactive, ajustant le poids des informations exogènes et, utilisant notre connaissance oceanographique du milieu.

c) Le cas limite est enfin celui qui revient pratiquement a inventer des structures thermiques :

En avril 1982, un upwelling precoce fut mis en evidence, le long des côtes gabonaises a l'aide de données Meteosat traitees par le logiciel rudimentaire (a cette époque) de l'antenne ORSTOM du CMS de Lannion. La calibration en temperature effectuee a l'aide de données des navires marchands, benéficia en outre de l'opportunité d'une croisiere oceanographique du N.O. Nizery (Piton, comm. pers.), dans cette region et à cette époque.

La comparaison que nous fîmes (Citeau et al., 1984) de la realite oceanographique de cette « carte Meteosat » et de celle produite par la National Weather Service (NOAA), indiqua que cette dernière péchait par une temperature trop elevée (de 4°C) au niveau de l'upwelling, dont les contours par ailleurs, étaient moins bien définis que sur le document issu de Meteosat : nous interpretons cette différence comme etant dûe à un poids trop grand de la climatologie dans le logiciel NOAA utilisé à cette epoque.

Nous avons également analyse cet effet probable de la climatologie sur les situations recentes et contrastrées de l'upwelling équatorial en juillet 1986 et juillet 1987 :

Les cartes jointes (figures 1 et 2) sont deux restitutions différentes du champ de température de surface dans le golfe de Guinée, l'une est dûe au NWS (National Weather Service) et l'autre utilisée à UTIS/CRODT a été exposée au paragraphe 3.

On observera là encore, que si les deux cartes s'accordent pour la restitution de l'upwelling équatorial en juillet 1986, par contre elles divergent pour l'importance accordée à l'upwelling équatorial de l'année 1987.

Or, il est établi que l'année 1987 s'est principalement signalée par une anomalie (positive) durable dans l'ensemble du Golfe de Guinée, en prenant pour référence la climatologie de Reynolds.

En conclusion, il apparait qu'aussi élaborés que puissent être les produits actuels de restitution de la température de surface, dans certains domaines de l'océan où se conjugent un couvert nuageux important et une faible densité de données bateaux, le recours à une climatologie devra se faire avec un esprit critique.

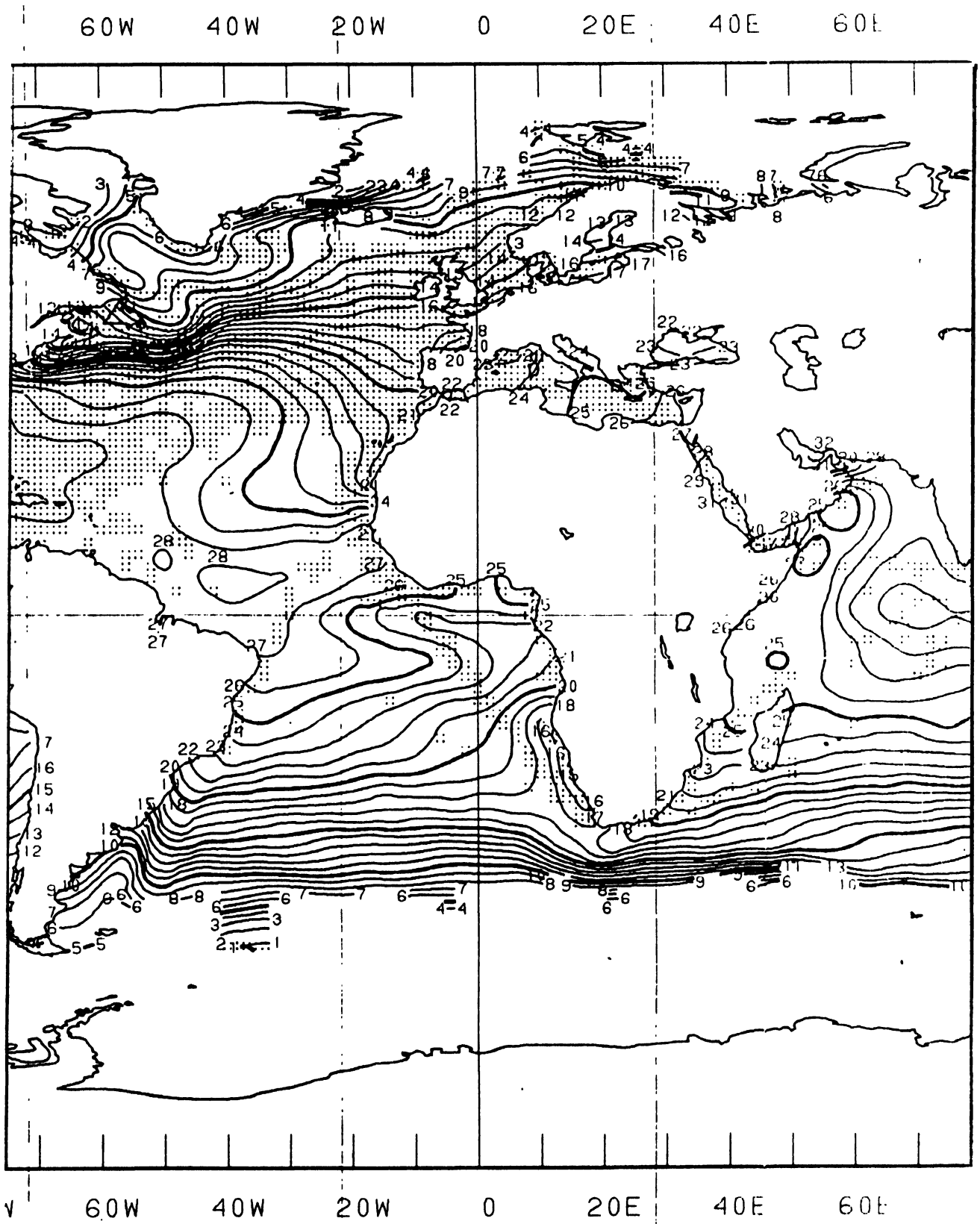


figure 1a : Extrait de la carte de température de surface produite par le NWS pour la periode du 17 juillet au 1er août 1986.

Citeau J., Guillot B. et Lae R. – 1984. Opération Listao : Reconnaissance de l'environnement physique en Atlantique intertropical à l'aide des satellites Meteosat et Goes-E. série IDT n° 63, Télédétection 10. ORSTOM Paris éd.

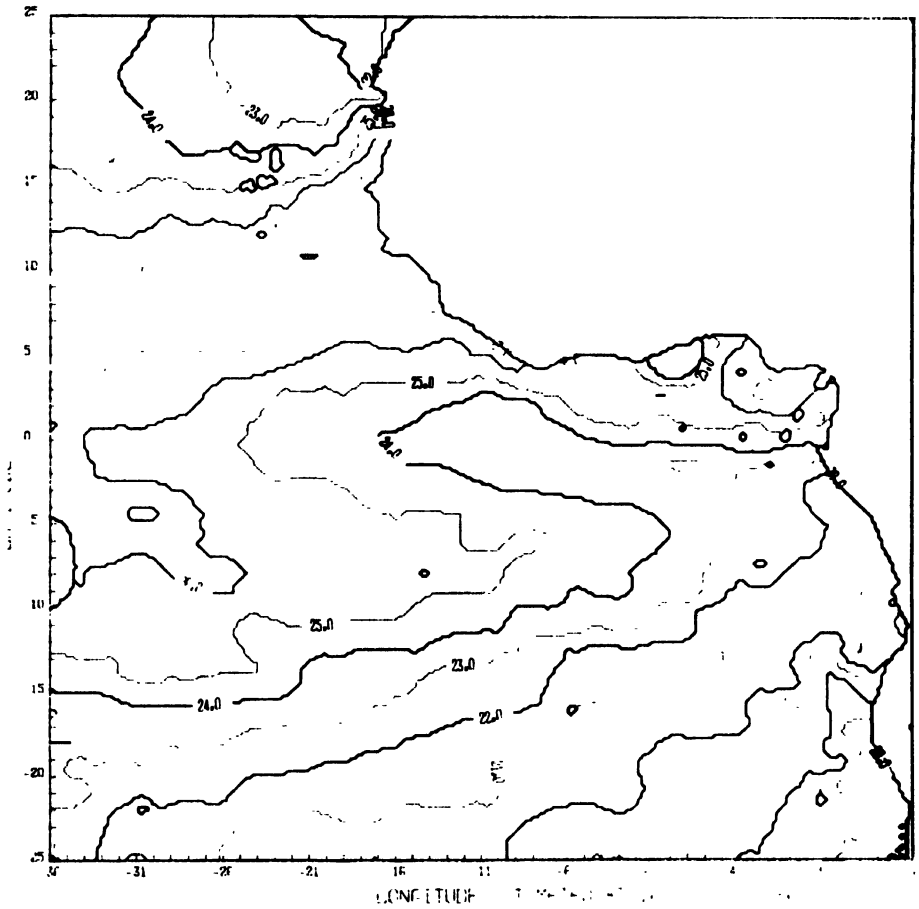


figure 1b : Carte de temperature de surface pour la deuxième quinzaine de juillet 1986, produite par UTIS-CRODT.

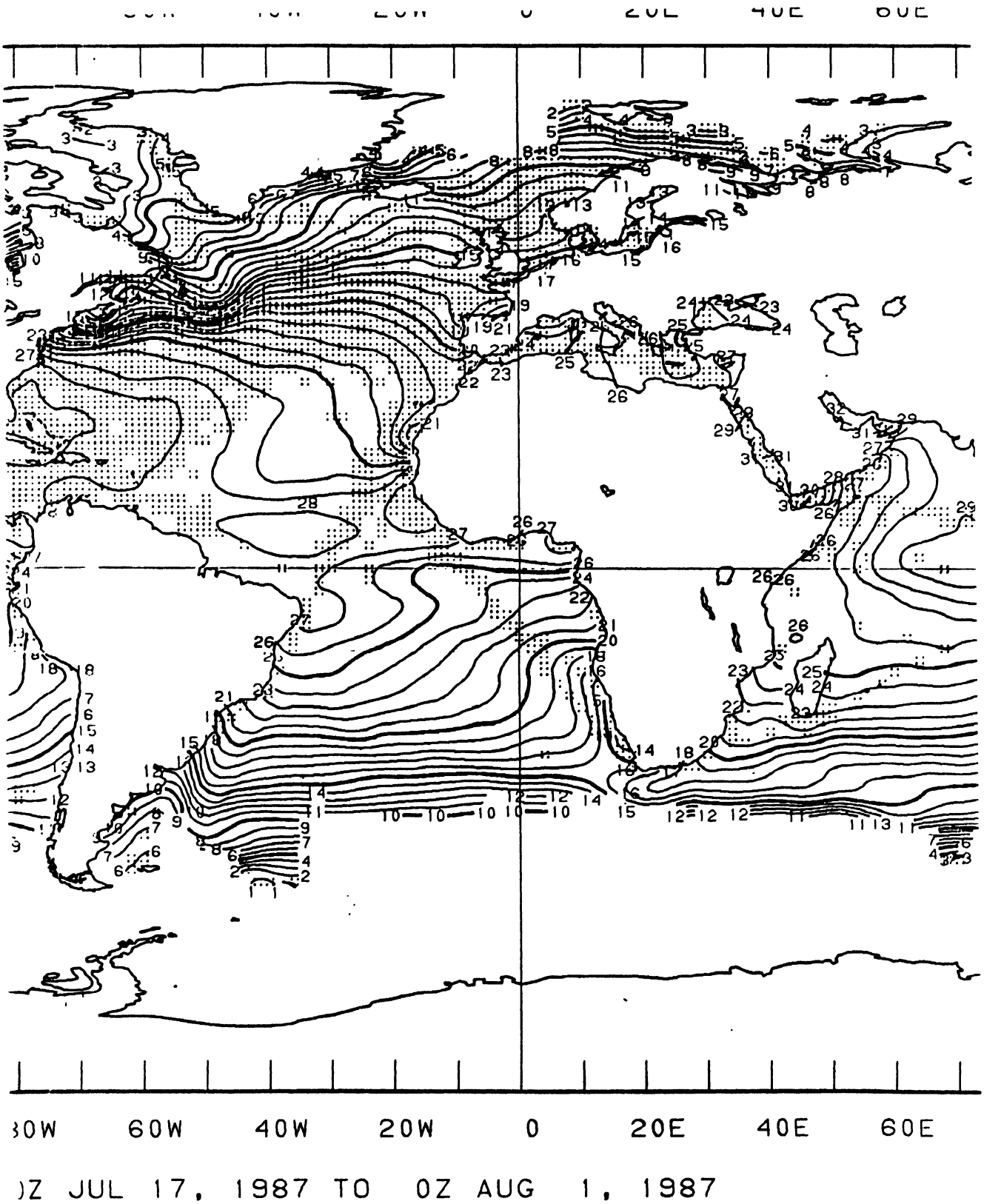


figure 2a : Extrait de la carte de température de surface produite par le NWS pour la periode du 17 juillet au 1er août 1987.

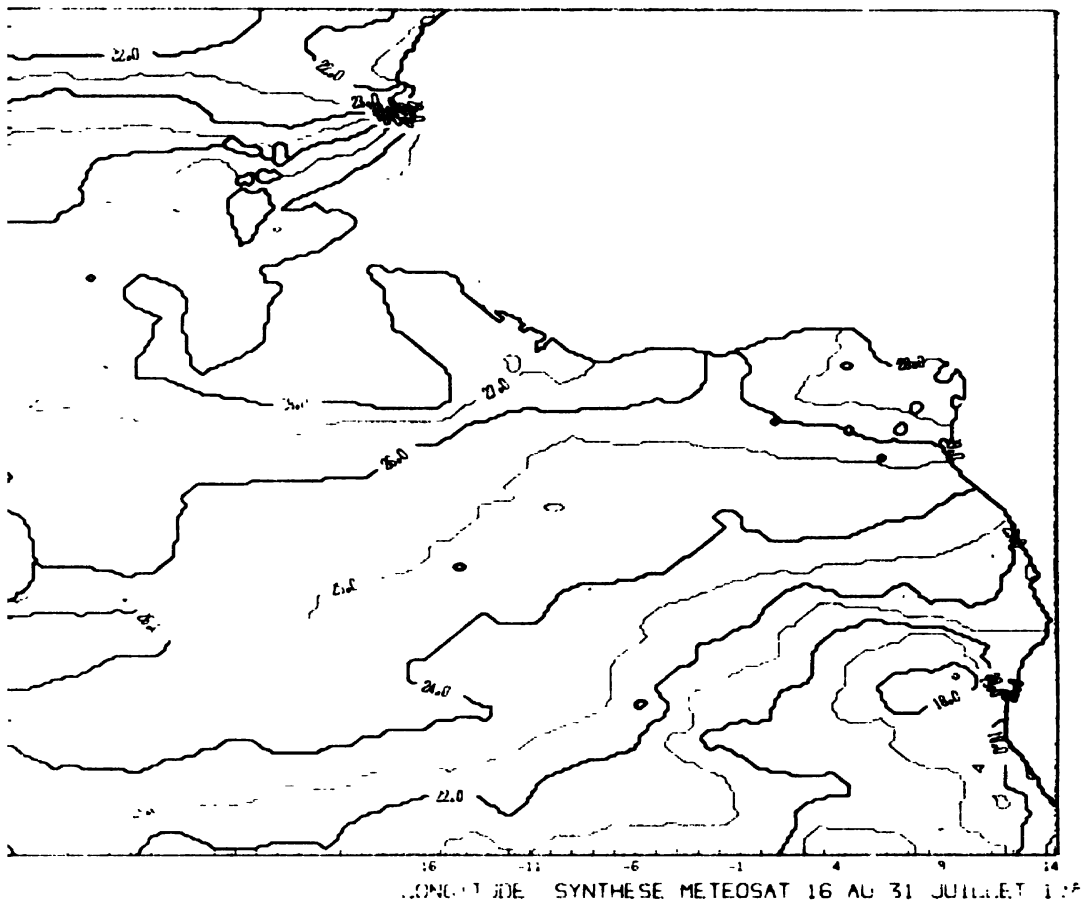


figure 2b : Carte de temperature de surface pour la deuxieme quinzaine de juillet 1987, produite par UTIS-CRODT.

CONCLUSION
Prophétie, prédiction ou prévision ?

Jean-Yves LE GALL
Direction des Ressources Vivantes
IFREMER - Paris

Les contributions des différents co-auteurs de ce rapport montrent bien que l'outil satellitaire intéresse, concerne, interpelle même les biologistes des pêches. Les chaînes d'acquisition de traitement de données mises au point par les informaticiens et les praticiens constituent des ensembles operationnels pour la cartographie de la température de la surface de mer particulièrement.

Par contre, les exemples régionaux exposés montrent que cet « outil satellitaire », malgre toute sa cohérence et ses performances, ne suffit pas à constituer le fondement essentiel de l'aide opérationnelle au guidage des flottilles thonières océaniques. L'objectif visé par le biologiste thonier est la determination dans le temps et l'espace de la **fenêtre environnementale optimale** où doit se trouver (selon toute logique humaine) telle espèce de thon. Les cas présentés notamment dans les pêcheries océaniques intertropicales de surface (albacore, listao, thon obèse) montrent que pour déterminer cette fenêtre, il faut integrer dans le processus logique de prévision, ou mieux le « modèle » prédictif, des phénomènes hydrobiologiques qui nécessitent un certain temps pour se réaliser, se dérouler, s'enchaîner et réaliser totalement la séquence idéale. Ce pas ou laps de temps s'écoulant entre une situation hydrologique réputée favorable et les bons rendements de pêche résultants peut-être de 15 jours dans l'Océan Indien et de 5 semaines pour le déroulement du « **scénario thermique idéal** » en Atlantique inter-tropical.

L'observation synoptique instantanée, même de qualite et quelle que soit l'ampleur de l'echelle ne suffit pas.

Par ailleurs, malgré tout l'intérêt de la température de surface de la mer, il n'est pas acceptable de reduire l'écologie des thons à une seule variable synthétique : la thermo-sensibilité. En fait, d'autres variables ou caractéristiques océanographiques : épaisseur de la couche homogene, gradient thermique de la thermocline, niveau d'immersion de certains isothermes et courants superficiels sont essentielles et déterminantes pour la distribution et la concentration des thons.

Les biologistes ne peuvent tenter de resoudre les problèmes et particulierement la determination de la **fenêtre environnementale optimale** en se cantonnant à l'utilisation des produits issus des capteurs passifs : température et couleur de la mer. Tout au contraire, les biologistes doivent utiliser pour ce même objectif les nouveaux produits océanographiques : champs de vent, hauteur de vagues, altimétrie et déplacement géostrophique des masses d'eau, issus des capteurs actifs : radars, altimètres, scatterromètres et reprendre ou poursuivre la recherche. Il nous faut dépasser la valorisation de sous-produits météorologiques et apparaitre comme des exploitants de premier rang des satellites océanographiques de nouvelle génération (tels GEOSAT, TOPEX/POSEIDON), des sources de données de terrain modernes (réseau de bouées dérivantes, radiométrie aérienne), et les systèmes de communication modernes de type IMMARSAT susceptibles de transmettre en temps réel dans les deux sens : l'information océanographique de la mer à la terre et le produit élaboré, tel le bulletin prévisionnel de pêche, de la terre à la mer.

Suivant particulièrement sur ce point Hunter *et al.* (1986) concluant sur l'évaluation de l'apport de la recherche passée et à venir sur la dynamique des déplacements de thons, nous pensons que le progrès dans le domaine de la connaissance des pêcheries de thonidés et de l'aide opérationnelle fiable aux flotilles thonières océaniques ne progressera significativement qu'en structurant les liens de cette recherche thonière avec les programmes d'océanographie conçus et développés à large échelle tels TOGA et WOCE.

Références : Hunter J.R. *et al.*, 1986. The dynamics of tuna movements : an evaluation of past and future research. *FAO Fish Techn. Rep.* (277) : 78 p.

11256

Liste et adresses des auteurs

Jean-Yves LE GALL, Coordinateur
IFREMER
Direction des Ressources Vivantes
66, avenue d'Iéna
75116 PARIS

Jean-Claude BERGES
Centre de Recherches Océanographiques
CRODT
BP 2241
DAKAR (Sénégal)

Patrice CAYRE
Antenne ORSTOM
Fisheries Research Center
Albion, Petite Rivière
ILE MAURICE

Jean CITEAU
Centre de Recherches Océanographiques
CRODT
BP 2241
DAKAR (Sénégal)

Henri DEMARCQ
Centre de Recherches Océanographiques
CRODT
BP 2241
DAKAR (Sénégal)

Cecile DUPOUY
Centre ORSTOM de Brest
BP 70
29263 PLOUZANE (France)

Bernard GUILLOT
Antenne ORSTOM
Centre de Météorologie Spatiale
BP 147
22032 LANNION Cedex (France)

Françis GOHIN
Centre IFREMER de Brest
BP 70
29263 PLOUZANE (France)

Michaël LAURS
NOAA/NMFS
South West Fishery Center
P.O. Box 271
LA JOLLA, California (USA)

Pierre LE BORGNE
Météorologie Nationale
Centre de Météorologie Spatiale
BP 47
22302 LANNION (France)

Claude LEROY
Centre IFREMER de Nantes
BP 1049
44037 NANTES (France)

Bernard LIORZOU
Station IFREMER
1, rue Jean Vilar
34200 SETE (France)

Françis MARSAC
Antenne ORSTOM
Mahé-Victoria
SEYCHELLES

Michel PETIT
Centre ORSTOM
BP 5045
34032 MONTPELLIER (France)

Bernard PIANET
Centre ORSTOM
BP A5
NOUMEA Nouvelle-Caledonie (France)

Jean-Michel STRETTA
Centre ORSTOM
BP 1045
34032 MONTPELLIER (France)